

UNIVERSITÉ PARIS X – NANTERRE

ÉCOLE DOCTORALE Connaissance, langage, modélisation

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Paris X – Nanterre

Discipline : Épistémologie, Histoire des sciences et des techniques

présentée et soutenue publiquement le 12 décembre 2007 par

Pierre TEISSIER

**L'ÉMERGENCE DE LA CHIMIE DU SOLIDE EN FRANCE (1950-2000).
DE LA FORMATION D'UNE COMMUNAUTÉ À SA DISPERSION.**

Directrice de thèse : Bernadette BENSAUDE-VINCENT

JURY :

Hervé ARRIBART (directeur scientifique, Saint-Gobain)

Bernadette BENSAUDE-VINCENT (professeur, université Paris X – Nanterre)

Ernst HOMBURG (professeur, université de Maastricht)

Terry SHINN (directeur de recherche, GEMAS/CNRS).

Remerciements

Les remerciements préliminaires font partie des us et coutumes du doctorat. Charmante obligation qui permettra aux historiens du futur de glaner de précieuses informations sur les réseaux universitaires.

L'État supportant seul la lourde charge financière de ma maigre subsistance, je n'ai aucun financement privé à déclarer et suis reconnaissant à l'École normale supérieure de Cachan qui m'a octroyé une allocation couplée. Je remercie mon département d'adoption - celui des sciences sociales - et mon département d'origine - celui de la chimie - pour m'avoir aidé et fait confiance. J'ai une pensée spéciale pour toi, Keitaro (Nakatani), pour ton ouverture d'esprit et ta gentillesse.

Je voudrais exprimer ici toute ma reconnaissance à ceux qui ont bien voulu raconter leurs souvenirs et contribuer à cette histoire, qui est avant tout la leur. Toute ressemblance avec des personnes ayant réellement existé ou vivant actuellement ne serait pas purement fortuite, mais indiquerait une forme de réussite. Puisse chacun d'entre vous trouver un peu de ses mots dans les lignes qui suivent. Si cette histoire n'est pas celle que vous attendiez, j'espère au moins qu'elle ne vous déplaira pas trop.

C'est à Paris, au Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide, que j'ai rencontré il y a trois ans et demi la chimie du solide et que j'ai commencé son étude historique. Merci Andrée Kahn-Harari, Daniel Vivien, Danièle Serreau, Hélène Mondange, Monique Perez y Jorba et Elisabeth Antic-Fidancev pour votre accueil chaleureux, la préservation de vos archives et votre implication dans le projet. Je vous dois le plaisir d'avoir fait la connaissance des enfants de Robert Collongues, qui ont si gentiment accepté de parler de leur père. Je suis parti en Aquitaine ensuite où j'ai arpenté

quelques jours durant l'Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux. Là-bas, j'ai eu la chance de croiser un homme hors du commun, Paul Hagenmuller, à qui j'adresse mes plus sincères remerciements. Merci beaucoup Michel Pouchard de vous investir encore sur ce travail et d'avoir évoqué vos souvenirs avec autant de sincérité. J'ai aussi eu le plaisir d'écouter Jean Étourneau, Jean-Pierre Doumerc, Jean-Pierre Chaminade ainsi qu'Adolphe Pacault. À l'Académie des sciences, j'ai fait la connaissance de Paul Caro, auquel je suis gré d'une version hérétique du récit communautaire. À Paris encore, au Laboratoire de chimie minérale et structurale de la faculté de pharmacie, j'ai longuement discuté avec Jean Flahaut et Jacques Rivet de chimie des hautes températures. En Bretagne, j'ai été envoûté par la verve de Jacques Lucas racontant l'aventure des verres non conventionnels à Rennes. Au Laboratoire des verres et céramiques, j'ai aussi eu le plaisir d'entendre le récit d'un jeune directeur de laboratoire, Jean-Luc Adam. Plus au sud, à Nantes, Monsieur et Madame Tournoux m'ont chaleureusement invité à partager leurs souvenirs autour d'un repas délicieux. Michel Tournoux, comme Michel Pouchard, a esquissé un panorama détaillé de la communauté française. Il m'a ensuite fait visiter l'Institut des matériaux de Nantes. Merci Serge Lefrant et Guy Ouvrard d'avoir trouvé le temps de me confier un point de vue plus récent. À Toulouse, au Centre d'élaboration des matériaux et d'études structurales, j'ai eu la chance de rencontrer l'un des « électrons libres » de la communauté française, Jean Galy, qui a décrit les rouages du système mandarinal et proposé une interprétation internationale de l'essor de la chimie du solide. Hervé Dexpert a, lui aussi, exposé sa vision transversale, liée à une carrière atypique. Au Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux de Toulouse, j'ai pu discuter avec Christine Bonino de l'évolution du statut des techniciens dans une équipe de

recherche. Je remercie aussi Abel Rousset pour ses propos originaux sur la chimie des matériaux et la vie d'un institut interdisciplinaire à la fin du siècle. Au fameux Laboratoire de physique des solides d'Orsay, j'ai rencontré deux personnages en tous points différents qui, chacun à leur façon, m'ont livré une vision périphérique de la chimie du solide. Merci donc à Denis Jérôme et Alec Moradpour. À Nancy, Albert Hérold a su développer un récit embrassant près d'un demi-siècle de chimie fort intéressant. À la Société française de chimie, j'ai écouté avec attention Marie-Claude Vitorge narrant l'aventure du Pirmat et de son influence sur les solidistes français. Au centre de recherches d'Aubervilliers, Patrick Maestro a développé une perspective industrielle de la chimie du solide, ce qui a ouvert un espace de confrontations. Enfin, je remercie les professeurs Jansen et Martin, qui, à Stuttgart, ont exposé une vision 'allemande' de la chimie du solide.

Le monitorat que j'ai effectué à l'Unité de formation et de recherche de l'université Denis Diderot (Paris 7) sur le campus de Jussieu m'a permis de rester proche des chimistes, qui ont suggéré plusieurs idées fructueuses sur la chimie du solide et la chimie universitaire. Merci Souad (Ammar) pour l'enthousiasme dont tu sais faire preuve et Fernand (Fiévet) pour la confiance que vous m'avez accordée pour les cours d'histoire des sciences.

Vu l'importance pour un thésard de l'accueil du lecteur en bibliothèque et de l'orientation des consultants débutants aux archives, je remercie l'équipe des archives du Cnrs à Gif-sur-Yvette, en particulier Marie-Laure, pour son travail efficace et les heures agréables passées dans ces locaux.

Quant à vous camarades solidaires du petit groupe d'irréductibles de l'histoire de la chimie, j'ai profité de vos conseils, de vos encouragements, de nos échanges parfois

déroutants comme des bons petits plats que nous avons partagés après nos séances de travail.

Enfin, je tiens à remercier sincèrement le Professeur Ernst Homburg de se déplacer depuis Maastricht et d'accepter de lire une thèse en français. Merci Terry Shinn de m'avoir amicalement guidé dans ma recherche de sens et d'avoir accepté de lire ce travail de thèse. Hervé Arribart, je voudrais vous dire combien je suis heureux que vous ayez depuis le début marqué un si vif intérêt pour un sujet qui vous doit beaucoup. Merci pour vos conseils et votre point de vue transversal, de la physique des solides à l'industrie des matériaux. Bernadette, j'ai adoré mener cette enquête en ta compagnie, merci pour ta censure « implacable » des images poétiques et pour la grande liberté d'action que tu m'as laissée.

PRÉFACE en guise d'amusement.

Une fresque légendaire de la chimie du solide : des forges cristallines à la douce chimie.

Il était une fois, il y a très très longtemps, avant la dernière guerre totale, vivaient deux puissants seigneurs rivaux. Chrétien et Chaudron - c'était le nom de ces deux princes - se partageaient un royaume sans roi, les « Terres minérales ». L'un contre l'autre, ils n'avaient cessé de guerroyer au nom de la vérité vraie. Pas à pas, chacun avait gravi les marches de la gloire et construit un empire pour se défendre contre les attaques de l'autre. La Chrétienté était bâtie autour du prestigieux domaine de la Sorbonne tandis que la Chaudronnerie s'appuyait aux coteaux du CNRS et de l'École de Chimie.

Chaudron, le plus âgé, avait choisi les armes des métallurgistes et forgeait des cristaux dans les meilleurs fourneaux du pays. Autour de lui, il avait rassemblé une nombreuse cour de disciples, apprentis chimistes dévoués à sa cause. Toute cette assemblée faisait fondre des mixtures solides, des poudres minérales dans les fours pour créer de précieuses pierres. Certains s'efforçaient d'atteindre toujours plus de pureté pour les gemmes métalliques, d'autres s'activaient à trouver toujours plus de défauts dans les terres minérales. Parmi ces derniers, un jeune champion - Collongues - jouait mieux que les autres à fabriquer des défauts dans les mélanges rouges, chauffés à l'air libre. Il fut bientôt le premier d'entre les pairs de la Chaudronnerie à maîtriser la croissance des cristaux minéraux uniques à haute température.

Vieillissant dans les tours d'ivoire de la Sorbonne, Chrétien préférait les potions liquides aux flammes des forges. Avec des vassaux tout aussi dévoués mais frondeurs parfois, il cherchait les cristaux au fond des mixtures aqueuses et non aqueuses avec une application frôlant l'obsession. Chrétien eut un rejeton plus vif mais aussi plus agité que les autres - Hagenmuller - qui se mit en tête de créer son propre royaume en repoussant un maître trop possessif. Il voulut connaître les secrets des terres minérales et, pour cela, déroba les armes des chevaliers-physiciens, une puissante aristocratie de l'esprit qui faisait fi des terres minérales. Ainsi, par un vol licite, il révéla quelques comportements cabalistiques de la matière solide.

Chacun des deux disciplines prit son envol, quitta le territoire de son maître et, visionnaire, alla découvrir de nouvelles terres minérales vierges. Bientôt, le tableau des éléments n'étant pas trop large, ils se rencontrèrent au détour d'une période, se jaugèrent et décidèrent de s'entendre : pas de guerre ouverte pour cette génération mais un accord implicite, un respect protocolaire qui n'excluait pas quelques oppositions larvées. Ils partagèrent le paysage chimique en posant des bornes au coin des colonnes qu'ils arpentaient. Que chacun reste chez soi et l'entente sera cordiale ! Ce qu'ils firent... les terres nouvelles étaient profondes et il y avait suffisamment de récoltes pour deux.

Ainsi, Collongues et Hagenmuller trouvèrent puis cultivèrent côte à côte un large pan du royaume des Terres minérales qu'ils nommèrent conjointement « Chimie du solide ». Ils devinrent à leur tour des seigneurs puissants et respectés, adoubant une nombreuse vassalité. Abandonnant leur château-fort universitaire, ils venaient vendre leur production aux riches marchands de la ville, promettaient aux soldats et parfois échangeaient avec les contrées étrangères. Ils laissèrent quelques champs en friche à quelques challengers nouveaux, qui parfois sans leur assentiment venaient picorer chez eux : dangereuse pratique qui pouvait très bien se terminer en ostracisme public !

À leur tour, les héritiers prirent la succession de l'ouvrage. Poussant hors du tableau les pionniers vieillissants, ils gardèrent d'eux l'image hiératique de deux pères fondateurs. Face à l'inflation des

héritiers, il n'y avait plus de place pour tous, les seigneurs furent moins puissants, une « république des savants » commençait à remplacer l'oligarchie ancienne. Certains labourèrent à nouveau le champ des ancêtres avec de nouvelles charrues ; d'autres cherchèrent d'autres horizons. Ces derniers fondèrent à leur tour une nouvelle discipline prospère : la « Chimie douce ». Deux nouveaux champions - Rouxel et Livage - revendiquaient une paternité pour le champ nouveau et l'obtinrent publiquement.

Et c'est ainsi que la Chimie du solide, reposant sur un édit auto-proclamé par des notables hauts en couleur, continuait de prospérer en son domaine, de commercer avec les États, les marchands et les soldats de l'extérieur et de se raconter au coin du feu le récit de sa fondation par des grands hommes de Science.

SOMMAIRE

L'émergence de la chimie du solide en France (1950-2000).

De la formation d'une communauté à sa dispersion.

Introduction générale.	1.
<i>Première partie. <u>L'état solide comme objet de recherches en sciences expérimentales</u> (1950)</i>	
I. État solide en France : construction institutionnelle, organisation territoriale et structuration disciplinaire.	27.
II. Les solides en chimie avant 1950 : superposition de strates familiales, sous-disciplinaires et trans-disciplinaires.	55.
<i>Deuxième partie. <u>Dynamiques communautaires : créations et exclusions</u> (1950-1980)</i>	
III. Des solides en chimie à la chimie du solide : approche globale.	119.
IV. Les laboratoires-types de la chimie du solide : approches locales.	205.
V. Itinéraire transversal en haute température : les fours solaires d'Odeillo.	307.
<i>Troisième partie. <u>La diaspora</u> (1970-2000)</i>	
VI. Trente ans de renouveau en chimie des solides (1970-2000) : instruments, méthodes et gestion de la recherche.	351.
VII. Les verres non conventionnels : un paradigme non conventionnel.	459.
VIII. Entre particularismes français et alternatives occidentales.	505.
Conclusion générale.	557.
Annexes	573.
Index	621.
Sources et bibliographie	627.

Introduction générale.

Introduction générale.....	1
<i>Pourquoi écrire une histoire de la chimie du solide en France entre 1950 et 2000 ?.....</i>	<i>3</i>
Récits du temps présent.....	3
Un contexte particulier, des études parcellaires.....	4
L'essor d'une histoire des sciences récentes.....	6
<i>Construire un corpus inhomogène entre sources écrites et orales</i>	<i>7</i>
Le choix des écrits.....	7
Recueillir et fixer une parole.....	8
Utiliser des sources hétérogènes.....	10
<i>Choix méthodologiques</i>	<i>11</i>
La science comme entreprise collective : les groupes scientifiques.....	12
L'idée de « frontières » plutôt que le réseau infini.....	15
Focalisation sur la « communauté scientifique ».....	16
Trois niveaux d'analyse.....	18
La vie de laboratoire : du quotidien aux cycles décennaux.....	19
La politique scientifique verticale : public/privé, université/industrie, fondamental/appliqué.....	20
La perspective horizontale : instrumentation, discipline et style national.....	20
<i>Organisation du récit et vue d'ensemble.....</i>	<i>22</i>

Pourquoi écrire une histoire de la chimie du solide en France entre 1950 et 2000 ?

Récits du temps présent.

Mon¹ premier présupposé est qu'il existe effectivement une chimie du solide. Il ne résulte pas d'une lecture de sources institutionnelles mais d'une parole entendue. Plus précisément, cette histoire se situe à la conjonction de trois récits entremêlés : une parole de chimiste, un regard d'historien, un récit historique. Le récit oral se raconte au sein d'une communauté de chimistes et porte sur la fondation d'une discipline. L'historien, extérieur à cette première communauté, entend un discours qu'il juge passionnant et légendaire suivant les canons de sa propre communauté. Enfin, le troisième récit – le présent manuscrit – s'efforce de déconstruire le récit oral, flottant et multiforme, pour le reconstruire sous la forme d'une histoire documentée et critique.

L'un des intérêts de ce travail repose donc sur le processus de déconstruction-reconstruction qui mène un récit oral d'une forme instable – un discours foisonnant, interne à un groupe et constitutif de ce groupe – vers une version historique, fixée par l'écriture et basée sur des présupposés et des choix méthodologiques. Je m'efforce de donner une cohérence fragile à un ensemble de sources hétérogènes afin de convaincre deux communautés universitaires, l'une historienne, l'autre chimiste.

Dans la préface, je me suis amusé à réécrire le récit oral de la fondation d'une discipline universitaire, la chimie du solide, sous la forme d'un récit de chevalerie.² Cette fresque est évidemment caricaturale. Elle suggère néanmoins un déroulement graduel où chaque degré de l'histoire est bâti par une génération sur les acquis de la précédente. On passe ainsi des précurseurs d'entre-deux-guerres – Chaudron et Chrétien – aux fondateurs d'après-guerre – Collongues et Hagenmuller – puis aux héritiers contemporains par un réseau de filiations généalogiques. Cette omniprésence des « grands hommes » se rattache à la tradition mandarinale française et au lien organique entre maître et disciples. Vu l'importance du récit oral dans la dynamique communautaire, j'en propose ici un deuxième avatar qui servira de référence par la suite. Ce récit décline au conditionnel une version moins édulcorée que l'épopée chevaleresque de la préface. Il est censé figurer le *récit légendaire*³ partagé par les membres de la communauté des chimistes.⁴

¹ Dans tout le mémoire, j'utiliserai la première personne du singulier pour marquer un choix méthodologique ou personnel. Ce « je » est plus motivé par la volonté de souligner une option particulière (parmi d'autres possibles) que par la revendication d'une « propriété intellectuelle ». Car, je crois à la dimension collective de toute création individuelle et, simultanément, à la possibilité d'un libre arbitre de l'être humain singulier.

² L'idée de l'épopée chevaleresque provient des termes « Chaudronnerie » et « Chrétienté », appellations plaisantes et imagées, utilisées par certains héritiers de ces empires familiaux [I Pouchard, 2004, p. 1].

³ Pourquoi parler de légende plutôt que de mythe ? J'emprunte la distinction à l'anthropologue Meillassoux [2001, p. 423] qui « considère que la notion de *légende* qualifie un récit transmis par la tradition, traitant de personnages, d'événements et de lieux portant des noms retenus par l'histoire mais objets de diverses déformations ; une légende est souvent porteuse d'une leçon politique ou sociale assez transparente. Par contre, dans le *mythe*, les personnages, les lieux, les événements ont perdu leur identité historique pour endosser des apparences intemporelles, merveilleuses et mystérieuses. »

⁴ J'ai construit le « récit légendaire » à partir des mots qui parsèment les témoignages des acteurs. Ce récit propose une synthèse des discours entendus pour fixer une sorte de mémoire collective partagée par les acteurs. Néanmoins, aucun témoin n'a proposé un récit aussi caricatural ni aussi complet.

Deux éminents professeurs d'entre-deux-guerres, Georges Chaudron et André Chrétien, se seraient disputé le domaine de la chimie minérale en construisant deux baronnies rivales. La lutte institutionnelle des deux précurseurs se nourrirait de différences disciplinaires marquées : le premier pratiquant une chimie (minérale) métallurgique, le deuxième aux prises avec une chimie (minérale) en solution. Elle aurait alors donné naissance à deux fiefs, deux écoles de pensée distinctes, tant du point de vue des méthodes scientifiques que des stratégies sociales de développement. Ce dépeçage binaire de la chimie minérale entre « Chaudronnerie » et « Chrétienté » aurait culminé durant les années cinquante pour la conquête d'espaces institutionnels, la collection de résultats scientifiques validés et la notoriété publique.

Chaque courant aurait ensuite cristallisé autour d'un élève du maître, fils spirituel, dépositaire de la méthode et porteur de l'acte fondateur de la chimie du solide. La descendance de Chrétien s'incarnerait en Paul Hagenmuller, qui aurait fondé un laboratoire de chimie du solide à Bordeaux au début des années soixante alors que l'héritier de Chaudron serait Robert Collongues qui, dès le milieu des années cinquante, aurait dirigé une équipe sur l'étude des oxydes métalliques solides au laboratoire du maître, à Vitry-sur-Seine. Dès lors, le passage de la chimie minérale à la chimie du solide s'opèrerait par l'entremise de ces deux élèves privilégiés, qui apparaîtraient comme les deux véritables fondateurs de la chimie du solide française. En établissant un lien entre la structure des solides et leurs propriétés et en insistant sur l'importance des applications industrielles, ils auraient révolutionné l'étude universitaire des solides minéraux.

À son tour, chaque fondateur aurait formé des disciples, ce qui constituerait la troisième génération après les précurseurs et les fondateurs : les héritiers et épigones. Daniel Vivien, Alexandre Revcolevschi, Jacques Livage, Jean-Pierre Boilot – entre autres – seraient dans les années quatre-vingt, quatre-vingt-dix les représentants les plus marquants issus de l'école Collongues, concentrée en région parisienne. De l'autre côté, Michel Pouchard à Bordeaux, Jean Rouxel et Michel Tournoux à Nantes, Jacques Lucas à Rennes apparaîtraient comme les héritiers directs de l'école Hagenmuller.

Un contexte particulier, des études parcellaires.

Le « récit légendaire » a tendance à insister sur la construction interne d'un groupe universitaire en passant sous silence le contexte historique. Or, l'après-guerre est une période d'essor de la recherche scientifique. Elle marque un changement d'échelle quantitatif en termes de personnels, de moyens, et qualitatif en termes de méthodes et d'instruments mis en œuvre. En France, elle est marquée par la montée en puissance du CNRS, le développement des universités et des grands organismes d'État : IRSID (1943), CNET (1944), CEA (1945)... Cette période correspond à un fort investissement des États – les États-Unis en tête – dans la recherche tandis que la science s'impose comme l'un des principaux ressorts de la puissance militaire [Dahan & Pestre, 2004] et de la croissance économique. Le rapport Vannevar Bush

[1945], conseiller scientifique du président américain, *Science: The Endless Frontier*, marque une époque où la science est perçue comme la grande aventure du siècle. C'est aussi le moment où les gouvernements occidentaux commencent à mettre en place de manière plus systématique des politiques étatiques de la science et de la technologie [Jacq, 1996]. En France, l'arrivée de Charles de Gaulle au pouvoir en 1958 amplifie le phénomène [Larcen & Perget, 2003].

La chimie du solide n'échappe pas à cette logique « utilitariste », elle en constitue au contraire l'un des piliers puisqu'elle permet la synthèse de nouveaux matériaux. Elle offre ainsi un terrain excellent où pourrait s'appliquer une politique scientifique. En effet, le domaine des matériaux est éminemment appliqué : réfractaires pour le fuselage des fusées spatiales, pour la construction du cœur d'une pile atomique ; batteries pour les véhicules électriques ; matériaux dopés aux terres rares pour applications optiques (téléviseurs couleur, lasers, scintillateurs en imagerie médicale) ; fibres optiques pour les télécommunications... Le militaire et l'économique deviennent constitutifs de « la science en train de se faire » [Latour, 1989]. Par ses applications, la chimie du solide universitaire est en interconnexion permanente et profonde avec le monde industriel et les réalités économiques.

Les études institutionnelles de la recherche universitaire et des politiques scientifiques sont nombreuses et servent de jalons : pour les politiques scientifiques [Prost, 1989 & 1990 ; Jacq, 1996] ; pour le CNRS [Druessne, 1975 ; Picard, 1989 ; Bidault, 1993] ; pour le département de la chimie au CNRS [Lanciano-Morandat, 1999]. Un Comité pour l'histoire du CNRS a déjà produit un certain nombre d'études ponctuelles intéressantes.

De manière générale, l'histoire de la chimie française d'après-guerre est parcellaire. Elle ne présente aucun tableau d'ensemble convaincant et la plupart des études – peu nombreuses – restent ponctuelles : une monographie sur l'Institut de chimie des substances naturelles (ICSN) de Pierre Potier [Le Roux & Walsh, 2006], une histoire du Centre d'études de chimie métallurgique (CECM) [Cornet, 1990]...

Pourtant, l'après-guerre est assurément une période de reconstruction de la chimie française par des jeunes chimistes qui adoptent peu à peu les outils physiques, instruments et théories. La caractérisation des propriétés physiques devient une condition *sine qua non* du travail des chimistes et l'instrumentation apparaît comme constitutive de la chimie du solide. Cette pratique est à rapprocher des mutations antérieures ou simultanées pour les autres chimies : analytique, organique, macromoléculaire, de coordination, biologiques... [Reinhardt, 2001 ; Morris, 2002]. D'autre part, les théories physiques issues de la physique du solide et de la mécanique quantique pénètrent les milieux de la chimie et viennent se confronter à la complexité des nouveaux matériaux. Ce rapprochement avec la physique est primordial dans le cas de la chimie du solide et pourrait même expliquer pour une large part le succès international de la chimie du solide française. L'informatisation progressive apparaîtra comme un facteur important de l'histoire tant pour l'évolution des instruments que pour les possibilités de modélisation. La confrontation avec un contexte disciplinaire plus large est donc primordiale. Les références historiques en physique des solides [Pestre, 1990 ; Hoddeson & al, 1992 ; Krige & Pestre, 1997], cristallographie [Balibar, 1991] (commémoration [Ewald, 1962]) ou science des matériaux [Cahn, 2001] serviront de points de comparaison. La confrontation sera d'autant plus intéressante que l'histoire de la physique, en s'appuyant sur la communauté des physiciens, a souvent tendance à sous-estimer l'apport de la chimie. Même si je me focalise principalement sur la science universitaire, les travaux en histoire industrielle serviront eux-aussi de repères : CNET [Atten, 1996], Pechiney [Le Roux, 1998], Saint-Gobain, Rhône-Poulenc...

Ainsi, la mise en contexte présente un double intérêt. Premièrement, le développement de la chimie du solide ne peut se comprendre que dans l'ensemble d'évolutions politiques, économiques et techno-scientifiques de la seconde moitié du vingtième siècle. Réciproquement, la création de nouveaux matériaux, permise par la chimie du solide (et d'autres), rend possible certaines de ces évolutions générales.

L'essor d'une histoire des sciences récentes.

Malgré le peu d'études sur la chimie d'après-guerre, l'histoire des sciences récentes constitue un champ de recherche en pleine expansion. Elle permet de renouveler les problématiques historiques [Söderqvist, 1997]. Je détaillerai seulement trois débats importants. Premièrement, l'histoire récente interroge la confrontation entre mémoire et histoire à travers l'histoire orale [Hoddeson, 1997b]. Une façon d'y répondre est de favoriser un dialogue entre historiens des sciences et acteurs de la recherche scientifique. Ainsi, à partir de 2000, Bernadette Bensaude-Vincent et Arne Hessenbruch ont dirigé un projet financé par la *Sloan Foundation & Dibner Funds* visant à rassembler de nombreux entretiens avec des scientifiques proches de la science des matériaux. Initialement hébergé par le site Internet du MIT, l'ensemble des entretiens a été transféré en février 2007 vers celui de la Société française de chimie (SFC). En plaçant ce projet d'histoire des sciences récentes dans une enceinte scientifique, le but est d'encourager des échanges de vues et d'informations entre historiens et chimistes.

La science récente reformule une deuxième question cruciale : la relation entre l'histoire des sciences et son objet d'étude. Au mois de juin 2007, de nombreux historiens des sciences du vingtième siècle se sont réunis à Strasbourg pour un séminaire intitulé « *Writing the History' of the Physical Sciences after 1945: state of the art, questions and perspectives* ». Les organisateurs plaçaient la question suivante au cœur du débat : dans quelle mesure la reconfiguration actuelle du champ scientifique – remise en cause de l'hégémonie des sciences physiques depuis quelques décennies – affecte le champ historique – l'écriture de l'histoire des sciences physiques depuis 1945 et l'évolution de l'histoire des sciences – ?⁵ Ce questionnement permet de repenser la relation entre le statut de l'histoire des sciences (dans le champ historique) et le statut de son objet (dans une société donnée). Ce faisant, il pose la question de la forme du récit en histoire : macro-récit qui embrasse la longue durée ou micro-récit du lieu et de la pratique ?

Enfin, la proximité (temporelle) de la science récente donne une actualité brûlante aux relations entre science et société. La fin du vingtième siècle est-elle marquée par un changement de régime de production des savoirs ? Certains sociologues anglo-saxons en sont convaincus et proposent le modèle des « nouveaux régimes de savoir » [Gibbons & al., 1994 ; Nowotny & al., 2002]. Selon eux, les années soixante-dix seraient marquées par le basculement d'un « mode 1 » (science disciplinaire et indépendante) à un « mode 2 » (hybride entre science et société, sans frontières). Par rapport à ce modèle, Pestre [2003] refuse l'image mythique du mode 1 (qui, selon lui, n'a jamais existé seul) et, à la rupture simple, oppose

⁵ Ce workshop était co-organisé par Soraya Boudia, Dominique Pestre et Sébastien Soubiran, s'intitulait. « *Up to the 1980s, physics dominated the other sciences and served as the epistemological model for numerous other fields and practices. In the last decades, physics has been challenged if not replaced in this dominant position, notably by the life (techno-) sciences, but other challengers include mathematics, management and economics. The history of the physical sciences, which has for so long structured the history of science, therefore needs to be interrogated. This has to be done with respect to two main dimensions, the changing place and nature of the physical sciences in the world over the last decades – and the evolution of the historical field, of the history of sciences itself.* » [Boudia & al., 2007, présentation].

l'idée d'une nouvelle articulation entre les deux modes : de minoritaire, le mode 2 serait devenu prédominant. Un deuxième modèle, celui de la « triple hélice » [Etzkowitz & Leydersdoff, 1997 ; 1998], propose l'avènement d'un assemblage organique université-industrie-État qui remodèle la production scientifique. Par rapport à ce modèle, Shinn et Joerges [2001] ajoutent l'instrumentation comme quatrième brin constitutif de la triple hélice. De plus, ils repèrent des cas de « mode transverse » impliquant les quatre brins de l'hélice dès le dix-neuvième siècle. De manière générale, la problématique des modes de production des savoirs dépasse le seul champ historique parce qu'elle touche aux questions du choix actuel des politiques scientifiques. Cette contemporanéité de l'étude et de l'action entraîne parfois l'historien sur le terrain des débats idéologiques.

Pour chacune de ces questions, la chimie du solide universitaire⁶ offre une étude de cas intéressante, qui pourrait enrichir les débats. Son histoire s'appuie sur les ressorts de l'histoire orale, son identité la définit en permanence par rapport à ses voisins universitaires (en particulier la physique) et ses ramifications rencontrent souvent la société (industrie, État, culture).

Construire un corpus inhomogène entre sources écrites et orales

Choisir ses « sources », voici sans doute le premier impératif méthodologique de l'historien. Mon idée de départ est simple : il s'agit d'utiliser simultanément des sources écrites avec des témoignages oraux.

Le choix des écrits.

L'histoire récente offre plusieurs spécificités. L'investigation historique interfère avec la vie privée. Il n'est donc pas toujours facile de savoir quelles informations relèvent du domaine public et de la sphère privée. Souvent l'archive n'a pas de statut bien défini : publique – puisque fabriquée dans une administration publique – ou privée – puisque écrite par une personne –. D'autre part, vu la proximité temporelle, le corpus disponible n'est pas homogène. Le trop plein d'informations est d'autant plus important que la science universitaire a elle-même connu une inflation extraordinaire en un demi-siècle (effectifs multipliés par vingt environ). Il s'agit donc de faire un tri important.⁷

Il est confortable d'utiliser des séries temporelles couvrant l'ensemble de la période. Focalisé sur le système universitaire, je croyais en trouver dans une institution comme le CNRS qui existe depuis 1939. Mais au cours de son histoire, le CNRS a changé ses habitudes. Au début de la période, les *Rapports sur l'activité générale du CNRS* regorgent d'informations sur les diverses sections. Par la suite, à partir des années soixante-dix, leur taille diminue, et, au cours des années quatre-vingt, ils sont réduits à la portion congrue de plaquettes de propagande. Les rapports de conjoncture quant à eux ne commencent qu'en

⁶ J'emploierai le plus souvent l'adjectif « universitaire » dans un sens générique pour désigner l'ensemble des universités, le CNRS et les écoles d'ingénieurs. L'emploi (rare) d'« Université » désignera aussi les trois entités.

⁷ Si on considère une population de mille chimistes pendant cinquante ans (ordre de grandeur pour la chimie du solide), la quantité de documents officiels (rapports, publications) produits atteint plusieurs centaines de milliers.

1959 (suite au nouveau rôle que la DGRST confie au CNRS) et gardent une bonne tenue jusqu'à la fin des années quatre-vingt. Ensuite, eux aussi perdent de leur intérêt. Inversement, au cours des années cinquante, les *Rapports d'activité* des laboratoires sont quasiment inexistantes. À partir des années soixante, le Centre demande à ses « laboratoires propres » puis à ses « laboratoires associés » de rédiger des rapports de plus en plus précis. Le contrôle devient systématique, la bureaucratie remplace les rapports directs et la taille des rapports croît régulièrement jusqu'à la fin du siècle. Malheureusement, la quasi-totalité des rapports de laboratoire ne contient pas les rapports comptables des laboratoires. Ceci pose la question de l'archivage des administrations de l'État. Qui a intérêt à archiver et qui choisit de détruire ? Quels sont les documents qui sont retenus et pourquoi ? Pour le CNRS par exemple, le service des archives est beaucoup moins important que le service de communication. En somme, pourquoi les archives publiques ne sont-elles pas mieux conservées et plus accessibles ?

Pour revenir au choix des sources, aucun des documents du CNRS que j'ai consultés⁸ n'offre de séries temporelles continues sur l'ensemble de la période. Il faut donc d'ores et déjà souligner un point crucial : la partialité de sources lacunaires. C'est essentiellement dans les rapports généraux (activité et conjoncture) du CNRS que j'ai perçu les comportements collectifs de la communauté scientifique sur la longue durée.

J'ai aussi mis à profit le passage dans les laboratoires de chimie de solide que j'ai visités pour consulter les archives dont ils disposaient. Là encore, l'archivage n'est pas une priorité. Passée une décennie, un document n'a souvent plus de valeur scientifique et l'universitaire s'en débarrasse. Là plus qu'ailleurs le statut du document est ambigu. Détruits, égarés ou mélangés, les documents sont souvent perdus pour l'historien qui arrive trop tard. La descente dans les sous-sols des bâtiments permet de se rendre compte des effets dévastateurs du temps, et, bien souvent, le désordre des profondeurs ne permet pas de trouver grand chose (dans un temps limité). La visite des laboratoires offre néanmoins l'occasion de rencontres fortuites avec des objets fascinants (instruments, photographies, lettres).

Enfin, certains acteurs ou leurs héritiers ont bien voulu me montrer ou me confier des documents plus personnels : notice des titres et travaux scientifiques, enregistrements audio, textes informels... Les scientifiques et leur entourage sont rarement conscients de l'intérêt des documents dont ils disposent : le cheminement qui mène du document-utile au document-souvenir puis au document-archive est souvent interrompu trop tôt. Pour obtenir des informations individuelles, j'ai aussi eu recours aux archives de l'Académie des sciences (dossiers personnels de chimistes qui y sont entrés). Là encore, la censure est grande.

Recueillir et fixer une parole.

La rencontre avec les acteurs de la comédie humaine constitue une chance incroyable pour l'historien contemporain. Outre le repérage, souvent inattendu, de sources inédites, elle se présente comme une sonde irremplaçable du passé, très différente des sources écrites et discours officiels. J'ai entrepris une campagne d'entretiens que j'ai retranscrits (plus d'une

⁸ J'ai dû faire un choix parmi les sources disponibles. La consultation des rapports d'activité (des laboratoires) de moins de trente ans a fait l'objet de dérogations, accordées par les Archives nationales (après deux mois d'attente). Je n'ai consulté aucun dossier personnel pour deux raisons essentielles : ils auraient constitué un corpus trop large et leur consultation est soumise à la réglementation des Archives nationales. Enfin, je n'ai pas non plus consulté les rapports d'évaluation du Comité national ni des laboratoires (conseil de laboratoire, conseil scientifique).

vingtaine) et utilisé des entretiens menés par d'autres historiens. J'ai essayé de suivre la méthode de l'« entretien semi-directif », défini en ethnologie.⁹

Les multiples récits – recueillis auprès des acteurs – nourrissent et abreuvant le corpus historique à divers niveaux. En défendant l'idée d'une « naissance » de la chimie du solide, ils ont d'abord suggéré l'existence d'un champ historique potentiel et influencé sa formulation. Ensuite, ils ont fourni en permanence des idées, des briques pour construire l'édifice historique, proposé des pistes d'investigation nouvelles, formulé des analogies fécondes ou des impasses troublantes. Sur le terrain, la visite de laboratoires et les entretiens individuels ont permis la rencontre de personnes accueillantes ou méfiantes, hautes en couleur ou timides, envers lesquelles l'historien se surprend à avoir des sentiments humains. Par les anecdotes racontées, les citations rapportées, les acteurs fournissent « la chair humaine » dont « l'ogre » historien se repaît [Bloch, 2002]. Les témoins disent ce que l'archive administrative censure, renseignent sur des savoir-faire tacites, des relations humaines, l'omniprésence du hasard. Chacun a pu taire ce que d'autres ont dit et dire ce que d'autres n'ont pas vu. Si la parole censure aussi, chacun ne se censure pas de la même façon.

L'histoire orale, quoique très utile, questionne l'historiographie contemporaine quelque peu déroutée par le rapprochement entre « mémoire » et « histoire » [Le Goff, 1988 ; Ricoeur, 2000]. Les entretiens doivent être considérés comme des sources spécifiques pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les témoignages renferment les instabilités de la mémoire, les fixités trompeuses d'une histoire trop souvent entendue et répétée, les logiques internes à une communauté simultanément « sujet » et « objet » de l'investigation historique, les exagérations, les politesses, les on-dit, les non-dits inhérents aux relations sociales, les points de vue plus ou moins distordus par la courte vue du quotidien... Deuxièmement, ce sont des documents *ad hoc*, fabriqués pour l'histoire, sorte de pacte entre l'acteur/témoin et l'historien.¹⁰ L'historien influence le témoin. Très simplement, en présentant ce sujet – « émergence de la chimie du solide en France (1950-2000) » – plutôt qu'un autre, j'ai contribué à légitimer la chimie du solide et orienté la réponse de chaque témoin. Réciproquement, chaque témoin a délivré un point de vue en fonction de son statut, de sa carrière, des circonstances dans lesquelles il parle. La tentation est toujours grande de réécrire l'histoire à la lumière des modes présentes. Troisièmement, le choix des témoins est un facteur crucial. Contrairement aux sociologues, je n'ai pas défini d'échantillon représentatif. Je me suis orienté de manière plus pragmatique, suivant les disponibilités et les incitations, mais je regrette aujourd'hui d'avoir privilégié les chercheurs, et parmi eux, les directeurs, et d'avoir préféré les témoins plus âgés aux plus jeunes.¹¹ J'ai supposé naïvement que l'âge et les responsabilités permettent de mieux embrasser la longue durée. J'y ai sans doute perdu des

⁹ L'entretien semi-directif « appelé également à canevas, à guide, focalisé ou semi-structuré, [...] consiste à laisser une liberté de parole tout en exerçant un contrôle sur ce qui est dit. Ce contrôle est assuré à l'aide d'un guide d'entretien que le chercheur construit à partir de ses hypothèses de travail. Ce guide sert d'aide-mémoire et s'avère d'une grande utilité lorsqu'il s'agit d'effectuer un travail comparatif. La maîtrise de l'entretien semi-directif, centrée sur la personne, exige une grande expérience, car l'enquêteur se doit d'avoir une écoute active pour effectuer à chaud une première synthèse des informations recueillies, nécessaire au travail de reformulation et de relance. » [Géraud & al., 2001, p. 40] À mon avis, l'interaction de deux individus renouvelés à chaque entretien (même si l'intervieweur conserve une même identité au cours des trois ans de thèse, il ne cesse d'évoluer en tant qu'individu et dans sa recherche), a priori libres, placés dans des conditions toujours différentes, relativise grandement la pertinence de la comparaison des entretiens entre eux.

¹⁰ La version finale des entretiens, que j'utilise dans la thèse, ne coïncide pas avec la première version orale. Chaque témoin a eu l'occasion de relire et corriger le texte avant de valider, par écrit, la version définitive.

¹¹ Ceci est d'autant plus regrettable que les sources institutionnelles insistent elles-mêmes déjà beaucoup sur l'importance des plus gradés. Par exemple, un bulletin du CNRS de 1949 [CNRS, 1949b] censé inventorier les travaux universitaires associe à chaque travail le nom de la personne de « plus haut grade » (sans mentionner le nom des autres acteurs).

informations sur les rapports de générations (opposition des anciens et des modernes) et de classes.

Par leur instabilité orale, par le questionnement de l'historien, par le choix des témoins, les entretiens oraux constituent des archives orientées. Pour sortir du piège des mots, la « micro-histoire » et l'« ethnométhodologie » peuvent fournir des clés de décryptage en montrant deux cas extrêmes de relations témoin/enquêteur.¹² Que dire pourtant d'une hésitation, d'un silence lors d'un entretien, du refus gêné d'une personne à qui l'on demande et qui refuse de témoigner, ou qui, ayant parlé, refuse de rendre public l'entretien ? Chaque silence rend plus insolite encore l'avidité de certains de parler, l'affluence d'anecdotes révélatrices hors micro. À d'autres moments, le témoignage peut ressembler à une anamnèse, à une sorte de récit pour extirper une frustration intime, enfouie durant de longues années. Malgré l'infinie variété du piège des mots entre aveu et parole égocentrique, je reste convaincu que les entretiens oraux constituent une ressource irremplaçable pour l'historien contemporain.

Utiliser des sources hétérogènes.

En histoire orale, comme pour toute histoire, pour limiter la subjectivité de la source, il faut croiser les informations entre elles. L'oral et l'écrit étant soumis à des logiques différentes, leur confrontation est encore plus cruciale. Par exemple, on peut se demander qui écrit un rapport d'activité, pourquoi et pour qui. Quelques témoins ont souligné à quel point leur patron avait l'écriture facile et fluide. Cette indication suggère qu'ils ont lu ce que le directeur écrivait. Or, tous les directeurs n'ont pas écrit d'ouvrages et certains ont rapidement cessé d'écrire des articles (eux-mêmes). Ils écrivaient donc ailleurs. En comparant les notices des titres et travaux scientifiques avec l'introduction des rapports d'activité de la même époque, j'ai souvent été frappé par la similitude des expressions ou par des phrases reprises telles quelles. Le directeur du laboratoire a donc une responsabilité particulière dans l'écriture du rapport d'activité du laboratoire – il écrit au moins l'introduction –. Celle-ci est d'ailleurs parfois datée et signée (par le directeur). Certains anciens directeurs m'ont donné des photocopies de rapports d'activité en guise de notice personnelle. Le rapport d'activité, censé évaluer le travail de l'ensemble d'un laboratoire, favorise une nouvelle fois la voix de quelques privilégiés.

Une fois établi le tissu des sources, il s'agit de l'utiliser suivant quelques règles explicites. La plupart des sources que j'ai examinées sont des « inscriptions ». Le rôle central des inscriptions en science a été souligné et partiellement explicité par l'« ethnométhodologie ». Depuis le *post-it*[©] collé à la paillasse, où s'agitent quelques signes cabalistiques griffonnés à la hâte, jusqu'à la publication finale, sanctionnée par le sceau de la communauté internationale, en passant par le cahier de laboratoire, les rapports d'activité ou même la dédicace au début des thèses, les inscriptions sont d'une telle diversité qu'elles constituent une source quasiment inépuisable sans pour autant être exhaustives. Je fixe trois principales règles d'utilisation.

¹² L'« ethnométhodologie » et la « micro-histoire » offrent deux situations extrêmes, diamétralement opposées et aux solutions différentes. Pour l'« ethnométhodologie », l'observateur, anthropologue du laboratoire, prétend tendre vers une neutralité par accoutumance, un degré zéro de l'observation. À l'opposé, le maître de la « micro-histoire », Carlo Ginzburg [1999] analyse, dans *Les Batailles nocturnes*, la relation entre l'inquisiteur et sa victime en décryptant les archives de justice. Je pense que, lors des interviews, ma propre position doit plausiblement se situer quelque part entre les deux situations.

Dans un premier temps, j'ai dû me familiariser avec les récits scientifiques (une formation de base en chimie est alors utile) sans prétendre tout comprendre. L'histoire n'a pas vocation à remplacer les rouages d'évaluation internes à la communauté, ni à devenir le moralisateur venu après la bataille pour compter les morts et consacrer la stratégie du vainqueur. En essayant de m'abstraire d'une histoire « jugée » à l'aune des vainqueurs sociaux et de la « vérité » actuelle en science (ce qui n'est jamais évident en pratique), mon principal objectif a été d'écrire un récit historique ouvert et non linéaire. Dans cette perspective, je refuse de souscrire à la notion d'« objectivité », qu'elle soit scientifique ou historique et lui préfère la notion d'« intersubjectivité » (consensus entre plusieurs subjectivités). Pour parvenir à une compréhension qualitative, j'ai dû lire des articles de périodiques, des ouvrages de référence, des thèses. J'ai consulté la plupart de ces documents soit en bibliothèque, soit dans les laboratoires de chimie du solide. Cette lecture a permis de comparer des pratiques multiples, a priori équivalentes, afin de questionner les impasses, les possibles et les rêves en suspens.

Outre la compréhension qualitative, un deuxième aspect important est la classification des inscriptions et des centres de recherche qui les fabriquent. Ranger les écrits dans des catégories puis en faire une analyse lexicographique simple (approche statistique rudimentaire) permettra de dégager des évolutions temporelles, parfois même sur l'ensemble de la période. De même, placer des laboratoires sur une carte et les inscrire dans des réseaux relationnels (nom, discipline, projet) clarifient le paysage de la chimie du solide. L'objectif est donc double, spatial et temporel.

Analyses qualitatives et quantitatives des écrits seront accompagnées d'une modeste approche picturale. Photographies de groupes et d'objets renseignent parfois plus que de longs discours [Doel & Henson, 1997]. L'instrumentation en particulier sera l'un des thèmes récurrents. L'intérêt de l'histoire des techniques a été souligné il y a longtemps déjà, par Lucien Febvre, dans le premier numéro de la *Revue des Annales* en 1929, ou par Bachelard à propos de la « phénoménoteknik ». L'histoire des techniques a d'abord pris la forme de grandes fresques systématiques à la manière des deux maîtres du genre, Daumas et Gille [Daumas, 1966-1979 ; Gille, 1993]. Plus récemment, l'instrumentation a fait l'objet d'études de cas plus précises [Van Helden & Hankins, 1994]. Des dictionnaires historiques sont disponibles [Bud & Warner, 1998] mais, souvent, il s'agit d'instruments d'avant 1950. Les techniques de pointe de la chimie du solide y sont rarement abordées. On commence néanmoins à s'intéresser à la signification des images produites par les techniques contemporaines [Galison, 1997 ; Allamel-Raffin, 2004 ; Hennig, 2007]. En insistant sur l'importance de certaines techniques pour les acteurs – comme la diffraction des rayons X ou la microscopie électronique –, j'essaierai de saisir la dynamique instrumentale à l'œuvre en chimie du solide. Je suivrai aussi un groupe s'intéressant à l'utilisation et à la conception d'instruments en le confrontant au concept de « *research technology* » [Shinn, 1997]. L'intérêt pour les techniques pourrait ainsi mettre en valeur le travail sous-terrain de ceux qui n'apparaissent pas nominalement dans les publications scientifiques : les techniciens. Il permettra aussi d'attirer l'attention sur les questions de sécurité et de santé au laboratoire.

Choix méthodologiques

Ce travail de doctorat vise à identifier les conditions humaines, intellectuelles, institutionnelles, sociales et politiques d'émergence d'une discipline scientifique dans le

monde occidental contemporain en mutation. Le récit envisagé implique donc plusieurs milliers de personnes durant un demi-siècle. Il a fallu avancer des hypothèses, faire des choix méthodologiques puis confirmer ou infirmer les intuitions premières en les replaçant dans un contexte plus vaste. Ces choix ont parfois conduit à des simplifications.

La science comme entreprise collective : les groupes scientifiques.

La recherche scientifique universitaire (contemporaine) correspond à un processus collectif¹³ dans lequel le laboratoire – et ses subdivisions en équipes – occupe une place centrale. La thèse est, selon moi, un nœud du processus que ce soit au niveau de l'individu ou au niveau collectif. J'ai donc choisi comme vecteurs de base du repère spatio-temporel le laboratoire et la thèse. Ce choix impose la durée de la thèse comme temps de référence. Reprenant l'idée des différents « temps de l'histoire » de l'École des Annales, je définis la durée de thèse comme « temps moyen » : de six à sept ans vers 1950, elle passe à trois ans à partir des années quatre-vingt, disons environ cinq années. Cette durée correspond aussi à l'intervalle de temps entre deux réunions d'un cycle de congrès (deux, trois ou quatre ans) ou entre deux promotions d'une carrière professionnelle. À partir de cette durée médiane, le « temps court » est celui du jour, de la semaine, du mois : le temps d'une visite dans un laboratoire, d'un congrès, d'un trimestre d'enseignement. De l'autre côté, le « temps long » est celui de la décennie (cycle de recherche de laboratoires, projet immobilier de grande envergure, durée de direction d'un laboratoire) et du demi-siècle. C'est le temps des évolutions culturelles, des projets de politique scientifique, des réorganisations communautaires ou d'une carrière individuelle.

À chacun des temps correspond une taille de groupe : quelques individus pour le temps court ; de la dizaine à quelques centaines pour le temps moyen ; de la centaine à quelques milliers (voire millions) pour le temps long. Le laboratoire est donc loin d'être le seul espace pertinent pour décrire la pratique scientifique et l'individu, en permanence, se déplace sur un patchwork social. Sans revendiquer l'exhaustivité, je m'efforce de tirer – autant que possible – les fils qui relient la maille individuelle aux tissus collectifs.

Avant de poursuivre, il s'agit de préciser une notion aussi complexe que celle de groupe. Pour plus de clarté, je définis le « groupe psychosocial historicisé » à la conjonction du « groupe psychosocial » et des paradigmes historiographiques contemporains. Pourquoi faire appel au groupe psychosocial ? La psychologie sociale insiste sur la structure duale irréductible couplant le libre arbitre psychologique des membres du groupe à une organisation collective interne, conditionnée par un environnement externe (linguistique, social et culturel). L'aspect psychologique est souvent caricaturé par la sociologie, qui réduit l'individu à des ambitions personnelles (argent, pouvoir, prestige). Le recours au groupe psychosocial devrait permettre d'éviter cet écueil. Le deuxième intérêt est plus formel. L'approche psychosociale distingue quatre niveaux d'interactions : intra-individuel, inter-individuel, social (au sens des classes), normatif. Chaque niveau d'interaction correspond à un niveau de groupe : individu, groupe « situationnel », groupe « positionnel » et groupe « idéologique » [Aebischer & Oberlé,

¹³ « Le sujet de la science n'est pas le savant singulier, mais le champ scientifique, comme univers de relations objectives de communications et de concurrences réglées en matière d'argumentation et de vérification [...] la science est un immense appareil de construction collectif collectivement utilisé. » [Bourdieu, 2001, p. 138-139].

1998]. La psychologie sociale cherche à distinguer, même si le formalisme est naïf, des niveaux d'interaction, que l'historien a peu tendance à repérer. En particulier, élargissant la représentation à autre chose qu'une production de sens, le groupe devient lieu d'« intégration », de « différenciation », de « changement », de « production de sens » et de « pouvoir ». Ceci renouvelle la perspective en épistémologie (souvent focalisée sur la production de sens) et en histoire des sciences (qui aime à valoriser la paire pouvoir/savoir).

D'un autre côté, la psychologie sociale pêche par excès de formalisme et de scientisme. Elle cherche en particulier à devenir une science expérimentale, qui voudrait reproduire des phénomènes « psychosociaux » en changeant une seule variable afin d'établir des lois. Imitant les sciences physiques, elle distingue un degré de « subjectivité » (pour le sujet de l'expérience) et d'« objectivité » (pour l'expérimentateur qui observe le sujet). La durée des expériences n'excède pas quelques heures, voire quelques jours. Non reproductible, contingente, séculaire, l'histoire préfère la recherche de « sens » à celle des lois. L'historien a aussi conscience qu'il participe au processus qu'il étudie et ne prétend donc pas à l'objectivité. En résumé, j'utilise le *groupe psychosocial historicisé* comme outil pour intégrer le formalisme et la dualité autonomie/déterminisme de la psychologie sociale à la recherche de sens en histoire des sciences. Quand je parlerai de groupe par la suite, j'aurai ces éléments-là en tête.

Outre son formalisme simple, le *groupe psychosocial historicisé* renvoie à trois questionnements importants pour mon propos. Premièrement, le « groupe idéologique » est proche d'interrogations sociologiques contemporaines, cherchant à concilier la créativité individuelle avec les processus collectifs, socialement déterminants. En particulier, Catherine Chevalley [2002] propose une approche intéressante de l'« invention de connaissance » à la conjonction d'un « penser-collectif » (introduit par Ludwig Fleck), dû à l'environnement social, et d'une « invention de soi ». Sans sous-estimer le déterminisme social, elle cherche à replacer l'individu au cœur du processus créatif – « Comprendre c'est inventer. Et ce sont les *individus* qui font ce travail. » – pour qu'il réapprenne à dire non, à ressentir, à réfléchir – « Ce qu'il faut faire aujourd'hui n'est pas inventer un nouveau code, mais reconstituer des individus capables de contredire, eux-mêmes et les autres, capables d'aimer, eux-mêmes et les autres, capables de "gouverner", eux-mêmes et les autres. » –. En plaçant l'individu au cœur du processus historique, ce type d'interrogation renvoie aux questions de choix de société, en particulier au rôle que peut jouer la société civile dans la « démocratie technique » contemporaine [Callon & al., 2001].

Deuxièmement, par ses fonctions d'« intégration » et de « différenciation », le *groupe psychosocial historicisé* fait écho aux interrogations anthropologiques sur l'« identité » et l'« altérité », qui seront déterminantes en chimie du solide. « Une identité collective n'est jamais réductible à la possession d'un héritage culturel, fût-il réduit à un "noyau dur", mais se construit comme un système d'écarts et de différences par rapports aux "autres" dans un contexte historique et social déterminé. » [Poutignat & Streiff-Fenart, 1995, p. 192]. L'approche anthropologique jouant sur la dualité identité/altérité enrichit une vision sociologique, parfois trop focalisé sur la compétition.¹⁴

Enfin, le *groupe psychosocial historicisé* incorpore les groupes que l'on rencontre communément en histoire des sciences contemporaine : « école de recherche » et « collège invisible ».¹⁵ Ces groupes peuvent être classés du plus petit, homogène et structuré, au plus

¹⁴ « le fonctionnement de la cité scientifique repose sur la compétition et l'existence d'un certain type de récompenses » [Lemaine & al., 1969, p. 147].

¹⁵ L'« école de recherche » est un concept largement utilisé par l'historiographie contemporaine en raison de son heuristique sur les questions de transmission des savoirs et savoir-faire [Geison & Holmes, 1993]. Sa définition canonique, donnée par [Geison, 1981], décrit l'école comme de « *small groups of mature scientists pursuing a*

vaste, hétérogène et lâche, suivant l'ordre suivant : école de recherche locale (au sens de Geison), école de recherche étendue (au sens de Nye), « collège invisible », puis « style national » [Nye, 1993]. À chacun de ces groupes correspondent des organisations sociales de tailles différentes : école locale dans un laboratoire ; école étendue entre plusieurs laboratoires ; collège invisible entre plusieurs espaces nationaux ; style national qui opère dans un système universitaire national.

À ces groupes largement acceptés en histoire des sciences, j'en ajoute un, moins utilisé mais central pour la chimie universitaire française : la « famille scientifique ». Cette appellation est couramment employée par les acteurs pour se situer au sein de l'espace national. De manière plus précise, je la définis comme un groupe non institutionnel, visible (consciencés intérieure et extérieure de son existence) et dynamique de scientifiques liés par un ensemble de relations hiérarchisées : maître-élèves et plus ou moins paritaires : élèves-élèves, élèves-techniciens. Si l'expression fait clairement référence à la famille de la société civile, l'équivalent du lien biologique est l'*hérédité doctorale* (c'est-à-dire avoir effectué sa thèse dans un laboratoire donné sous l'autorité du maître), l'équivalent des liens sociaux, les interactions privilégiées qui se perpétueront durant le reste de la carrière professionnelle : camaraderie, cooptation, compétition consanguine, voire rupture avec le patron (pour tuer le père). La famille scientifique se démarque des autres groupes utilisés en histoire des sciences sur au moins trois points déterminants : la prédominance de l'« ancêtre commun » – le patron ou le « mandarin »¹⁶ –, personnalité forte autour de laquelle se structure la famille ; la place centrale accordée à la thèse dans le processus de socialisation du scientifique ;¹⁷ la taille de la famille, non fixée a priori, qui peut varier du petit groupe de recherche autour d'un jeune professeur à un véritable « empire scientifique » dans l'orbite du mandarin. Avoir recours à la « famille scientifique » est un exercice délicat. Certes, la famille est vécue, de l'intérieur, par les acteurs eux-mêmes. En France, le mandarinat est hérité de l'université d'entre-deux-guerres. Mais, l'organisation familiale renvoie aussi – et surtout – à trois structures mythiques

reasonably coherent program of research side-by-side with advanced students in the same institutional context and engaging in direct, continuous social and intellectual interaction ». Cette définition locale a été étendue par [Nye, 1993, p. 32] : « I use the term research school in a broader sense that allows for a school of individuals to be linked through a network of institutions and generations. » Un « collège invisible » (ou « cercle social ») « repose sur des réseaux d'interaction indirecte qui ont pour effet d'assurer, soit immédiatement, soit par des tiers, des relations entre la plupart des membres du groupe [...] On ne décèle aucune organisation formelle comportant des critères d'exercice de l'autorité ou des normes prescrivant un certain type de comportement. Si le réseau existe, c'est à la fois parce que ses membres partagent des intérêts communs et parce qu'ils n'appartiennent pas à une seule et même organisation. » [Crane-Hervé, 1969, p. 167-168].

¹⁶ L'expression fait référence aux hauts fonctionnaires lettrés de l'empire chinois. Ringer [1969] les replace dans une perspective européenne (en particulier allemande) comme un « idéal type » qui constitue une élite sociale et culturelle qui doit son statut plus à ses diplômes scolaires qu'à l'hérédité (biologique) ou à la fortune (économique). « For the European setting, I would define "the mandarins" simply as a social and cultural elite which owes its status primarily to educational qualifications, rather than to hereditary rights or wealth. The group is made up of doctors, lawyers, ministers, government officials, secondary school teachers, and university professors, all of them men with advanced academic degrees based on the completion of a certain minimum curriculum and the passing of a conventional group of examinations » [Ringer, 1969, p. 5-6]. Même si l'analyse de Ringer délaisse le monde universitaire, il désigne les professeurs d'université comme « *mandarin intellectuals* ».

¹⁷ La place centrale accordée à la thèse constitue un présupposé discutable. Les techniciens, qui pourtant appartiennent à la famille, se trouvent de fait exclus (parce qu'ils ne font pas de thèses). Les chercheurs ont bien d'autres référents au cours de leur carrière que la thèse : avant (structures universitaires, corporatisme des écoles d'ingénieurs) et après (formation post-doctorale). Je pense que ces expériences sont, en moyenne, moins cruciales que ne l'est la thèse parce qu'elle constitue le moment-clé où l'entrant est le plus malléable mentalement (initiation à la recherche) et le plus démuné socialement (moins de relations de travail extra-laboratoire). L'« hérédité doctorale » (et par conséquent la famille scientifique) sera d'autant plus prégnante que la thèse est longue, le maître tout puissant, les élèves peu mobiles, les générations proches de l'ancêtre commun, etc.

de la culture occidentale : la famille, le clan et la dynastie.¹⁸ Suivre la « famille scientifique » n'est donc pas sans danger pour l'historien, qui pourrait se perdre dans le discours mythologique dont, justement, il veut s'extraire. Il faudra garder à l'esprit que, malgré l'importance structurante du mandarin, la famille ne se résume pas – loin s'en faut – à ce seul individu,¹⁹ et que tous les membres jouent un rôle, plus ou moins caché. Si les acteurs se définissent (et construisent leur communauté) en référence aux « grands hommes », l'historien n'a pas à refuser ce concept mais il peut l'analyser en soulignant sa dimension collective et en remplaçant le « génie » individuel par l'organisation, lente et contingente, d'un groupe d'individus aux rapports de forces complexes et aux rêves multiples.

L'idée de « frontières » plutôt que le réseau infini.

J'ai choisi le groupe pour raconter l'émergence de la chimie du solide au sein d'un monde qui échange. Pourquoi préférer le groupe au « réseau », cher aux sociologues « anti-différentiationnistes » ? Contrairement au réseau, le groupe est repérable par une limite – même fluctuante – qui distingue un intérieur d'un extérieur. C'est justement la mise en perspective de deux espaces, distincts mais en interaction, qui est intéressante avec le groupe. Si l'on adopte le point de vue d'une mécanique sociale, le groupe occupe un volume de l'espace social dans lequel se produisent des interactions plus denses et plus intenses qu'avec l'extérieur. Subséquemment, ces interactions ne sont pas toujours linéaires – qualitativement non explicitables – ni toujours observables. Cette opacité inhérente au groupe n'en interdit pas pour autant une certaine intelligibilité : les relations non explicitables peuvent être considérées soit comme perturbations du second ordre (par rapport aux explicites), soit comme causes de phénomènes observables (et donc qu'on peut inférer à partir des conséquences observées). Ceci est une hypothèse de travail. Le groupe se distingue donc du réseau par une densité interactionnelle, plus ou moins opaque, et une finitude. Le réseau au contraire suggère une image d'interactions segmentées et identifiables, qui peuvent former des chaînes quasi infinies.

Autre différence cruciale : le groupe se construit par un extérieur qui le reconnaît en tant que groupe. Pour la « famille scientifique » par exemple, non seulement les membres sont conscients d'y appartenir mais encore les acteurs extérieurs envisagent la famille comme une entité homogène. Comprendre l'émergence d'une discipline scientifique nécessite l'idée de différenciations (sociale, culturelle, cognitive) par rapport à l'extérieur et d'intégrations intérieures. Le réseau n'est pas un outil adapté pour une telle démarcation. La primauté du groupe n'empêchera pas d'évoquer l'existence de réseaux transversaux. À une interpénétration multiple de groupes répond l'enchevêtrement de réseaux protéiformes.

Le groupe définit donc des zones hétérogènes sur le territoire social, entre un intérieur dense et un extérieur multiple. Entre les deux se trouve une frontière. Le concept de

¹⁸ Le recours à la structure familiale renvoie à des représentations mythologiques millénaires (tradition monothéiste de la filiation depuis Adam et Ève), séculaires (l'histoire de France a d'abord été une histoire de rois et de dynasties) et contemporaines (le système universitaire français a longtemps favorisé le mandarinat et la cooptation, n'a pas encouragé la mobilité entre le doctorat et le professorat et reste attaché à la mémoire des grands hommes [Abir-Am & Elliott, 1999]).

¹⁹ Bourdieu [2001, p. 210] par exemple rappelle sa méfiance à l'égard « du concept de "mandarin", lui-même assez simpliste et sociologiquement peu adéquat ». Pour ma part, je le trouve adéquat si l'on considère que les mandarins sont des « sujets collectifs » indissociables de la famille [Bourdieu, 2001, p. 139]. Par la suite, j'utiliserai mandarin (sans guillemets) dans le sens d'un savant cumulant positions institutionnelles, honneurs académiques et prestige scientifique au sein de l'Université. Ceci n'interdit pas à certains mandarins d'étendre leur mandarinat vers le monde industriel en particulier, voire la sphère politique.

« *boundaries crossing* » se révèle être un outil puissant pour saisir cette hétérogénéité.²⁰ Thème en vogue en sociologie des sciences [Star & Griesemer, 1989 ; Abbott, 1995 ; Lurçat, 1997 ; Gyerin, 1999 ; Shinn, 2005], la traversée des frontières implique trois espaces bien définis : l'intérieur, l'extérieur et la frontière. Celle-ci n'est pas une simple ligne de démarcation : elle est aussi lieu de convergences, d'échanges et de créations.²¹ Les objets qui traversent les frontières ne sont pas non plus forcément humains même si l'image de la frontière est évidemment empruntée à la géographie politique. Horizontalement, la frontière permet donc de visualiser des zones d'influence sur un territoire national ou dans l'espace disciplinaire, à l'Université. Mais il est aussi possible de l'utiliser verticalement pour distinguer des feuillets stratifiés, à des échelles différentes. Du « microscopique » au « macroscopique », on trouve le groupe de recherche avec quelques individus, puis le laboratoire qui l'abrite, la famille, le groupe thématique (ou domaine d'étude), la communauté, l'université, l'Université, la société française et, enfin, la planète, avec ses relations internationales. L'un des objectifs pourrait être de tracer des cartes historiques de groupes et réseaux en interaction du laboratoire aux sphères macroéconomiques et géopolitiques. Cartographie à trois dimensions du volume social, cette sonde ponctuelle permettrait de mieux situer/comprendre la place dévolue aux sciences expérimentales dans le palimpseste du monde contemporain.

Focalisation sur la « communauté scientifique ».

Je me suis focalisé sur un groupe particulier, la « communauté scientifique ». La communauté est une entité sociale vaste et complexe, qui contient des sous-groupes en interaction (attractive et répulsive). Ses membres partagent des biens, des pratiques, des intérêts communs, ce que Thomas Kuhn [1962] a appelé « paradigme » dans un premier temps. Pour répondre aux critiques formulées par sa propre communauté, il a distingué par la suite (1970) un paradigme sociologique, la « matrice disciplinaire », et un paradigme philosophique, la « phase d'apprentissage ». ²² L'existence et les limites d'une communauté sont soumises à une reconnaissance interne mais aussi à une définition externe. Groupe de l'altérité externe et de l'identité interne, la communauté scientifique met en commun des connaissances (savoir, savoir-faire, méthodes, objets, langage), se construit sur des sentiments (luttres de pouvoir et affinités personnelles) et s'ancre dans des institutions (administration, congrès, revues). Lieu de créativité individuelle et d'échanges collectifs, elle produit une connaissance relative à ses règles de fonctionnement et ses croyances. La « vérité » quitte alors sa valeur d'absolu pour prendre une signification « intersubjective ». Elle résulte désormais d'une construction sociale non définitive, d'une négociation entre des forces

²⁰ C'est à Terry Shinn (2 octobre 2006) que je dois la suggestion de formaliser la différenciation des groupes et des communautés par le concept de « frontières ». Je le remercie également pour les éléments bibliographiques qu'il m'a fournis.

²¹ Le mot français de « frontière » ne rend pas vraiment compte de la complexité de la « *boundary* » anglaise. Il évoque surtout la démarcation géographique (linéaire), qui souvent nie le passage, et ne porte pas l'idée d'une étendue dans laquelle il y a création. Il faudra donc entendre la frontière dans le sens des *limes* latines : frontières de l'empire et chemins transversaux qu'emprunte le paysan romain pour passer d'un champ à l'autre.

²² « *On the one hand ["sociological"], it stands for the entire constellation of beliefs, values, techniques, and so on shared by the members of a given community. On the other ["philosophically [...] deeper"], it denotes one sort of element in that constellation, the concrete puzzle-solutions which, employed as models or examples, can replace explicit rules as a basis for the solution of the remaining puzzles of normal science.* » [Kuhn, 1996, p. 175].

subjectives dispersées, qui sont temporairement parvenues à un consensus (instable) au sein d'un groupe donné.²³

Où la communauté est plus complexe qu'il n'y paraît, c'est que, malgré des échanges permanents, elle n'est pas réellement homogène. Un double mouvement créatif y opère : à une uniformisation globale lors de la « phase d'apprentissage » à l'université répond une diversification par différenciation locale des méthodes et savoir-faire employés. La « matrice disciplinaire » coexiste avec différents « programmes de recherche » [Lakatos, 1978] locaux. Ceci pose la question de la possible coexistence d'écoles de recherche dans une communauté scientifique.²⁴ À une originalité des « moules intérieurs »²⁵ s'oppose une uniformisation des pratiques communautaires. L'émergence de la chimie du solide est particulièrement intéressante sur ce point-là dans la mesure où elle met en scène ce double mouvement intégration/différenciation qui ne cesse de réorganiser la communauté.

Pourquoi la communauté prend-elle une dimension spécifique dans ce travail de thèse ? Si j'ai rencontré la chimie du solide, c'est d'abord à travers le « récit légendaire » tenu par le groupe sur lui-même. Si cette étude historique a vu le jour, c'est en partie parce que des personnes se sont senties appartenir à une communauté et qu'elles ont voulu la raconter. La primauté accordée à la communauté scientifique se situe donc à la conjonction d'un présupposé historiographique (choix du collectif) et d'une spécificité de l'objet d'étude (discours identitaire fort). À la manière du chimiste qui, selon Marcellin Berthelot, crée son objet d'étude, l'historien de la chimie façonne lui aussi son sujet.²⁶

Il s'agit alors de comprendre dans quelles mesures la chimie du solide s'est construite en France sur une identité communautaire. Comment saisir l'identité commune ? Est-elle d'ailleurs unique ? La question identitaire soulève deux séries d'interrogation : l'une vers la nature, l'autre vers l'histoire. La première interrogation touche à la relation entre la matière et l'idée de matière. À un objet d'étude – le solide – répond une représentation – chimique – de cet objet. La relation entre matériel et idéal passe par le truchement de groupes sociaux, en particulier par la communauté scientifique. Comment la structure de la matière va-t-elle influencer sur la structure communautaire en train de définir ses propres croyances ? Et réciproquement, comment une représentation culturelle influence-t-elle l'organisation communautaire, qui, par ses résultats scientifiques, va décider de la structure de la matière ? Dans cet aller retour entre matériel et idéal, la communauté scientifique constitue le relais principal, qui interroge la démarcation nature/culture. Assurément, son identité est profondément marquée par la matière qu'elle étudie (avec des instruments) et par les représentations et croyances (théories) qu'elle développe à son contact. La deuxième série de

²³ Je pense ici à la définition de la communauté donnée par Chevalley [2002], empruntée à Bohr et Pauli : une communauté est « un lieu où l'objectivité se définit par l'accord intersubjectif d'un certain nombre d'individus qui parviennent à se communiquer leur expérience dans un langage non ambigu, parce qu'ils acceptent les mêmes modes perceptifs, les mêmes formalismes et les mêmes grandes stratégies d'interprétation », c'est-à-dire qu'elle est « a-rationnelle » (ni rationnelle, ni irrationnelle). En revanche, je réfute la non-ambiguïté du langage, fût-il scientifique.

²⁴ Le deuxième sens du paradigme kuhnien, la « phase d'apprentissage », porte toute l'ambiguïté du processus d'intégration/différenciation puisqu'il désigne simultanément l'enseignement global uniforme (à l'université et dans les ouvrages, les connaissances sont censés être universelles) et local (savoir-faire endémiques, attachés à un laboratoire particulier).

²⁵ Le « moule intérieur » est un terme popularisé par le biologiste matérialiste Buffon au cours d'un débat sur « le développement embryonnaire » qui l'opposa au leibnizien Maupertuis au milieu du XVIII^e siècle (information due à Stéphane Tirard).

²⁶ Considérer la primauté de la communauté constitue un présupposé méthodologique important. Ceci pose une question centrale pour l'historien, qui écrit forcément à rebours. Si la communauté de chimie du solide n'existe vraiment qu'entre 1965 et 1980, que décrit l'historien en 1950 ? Réciproquement, quels sont les options dont il dispose pour la période postérieure, entre 1980 et 2000 par exemple.

questions touche à la stabilisation de la communauté. La communauté de chimie du solide converge-t-elle vers une discipline scientifique reconnue ? L'émergence de la chimie du solide en France suit-elle les schémas classiques de formation d'une discipline universitaire ? Y a-t-il intégration ou agrégation de plusieurs sous-disciplines ou spécialisation à partir d'une discipline-parent ? La « connaissance disciplinée » correspond-t-elle alors mieux à l'arbre d'Auguste Comte ou à l'archipel de Paul Weiss ?²⁷ L'équilibre communautaire est-il stable dans le temps ou, très sensible aux perturbations internes et externes, va-t-il disparaître rapidement ?

Pour ces deux types d'interrogation nature/culture, stabilisation/évolution, l'historien se trouve confronté à la puissance du mythe des origines et du mythe identitaire. Durant la phase de construction, le mythe constitue un ferment du groupe pour rassembler des individus, des représentations et des objets éparés. Perçu comme un « ensemble lié d'images motrices » (Georges Sorel cité dans [Girardet, 1986, p. 13]), le mythe se fait porte-parole d'un groupe en train de se fabriquer, c'est-à-dire de passer de l'hypothétique au concret, du potentiel à l'actuel. Il résume probablement les représentations communes de soi et de l'autre, les idées symboliques de la matière, les visions que le chimiste a du monde. En tant que réponse à « des phénomènes de déséquilibres sociaux », le mythe révèle « des tensions à l'intérieur des structures sociales, comme des écrans sur lesquels le groupe projette ses angoisses collectives, ses déséquilibres de l'être » (Roger Bastide, cité dans [Girardet, 1986, p. 178]). Après la phase de construction, le récit légendaire constitue un mode de stabilisation visant à contrecarrer les effets du désordre historique. Toute l'ambiguïté et la force du mythe sont là. Comment un récit légendaire, d'abord porteur d'une évolution radicale, devient, par un retournement progressif, le défenseur du conservatisme social ? Comment passe-t-on d'un mythe, force sociale, à un mythe, apôtre de la nature ?

J'ai essayé de ne pas réifier le concept de communauté, d'éviter les schémas théoriques et de coller aux réalités quotidiennes des acteurs. Pour la période 1950-1980, cette approche s'est avérée intéressante. La mise en évidence d'un « récit légendaire » explique comment, malgré les changements incessants de noms, la communauté garde une identité forte au cours du temps. Le tournant de 1980 a posé un problème spécifique dans la mesure où la communauté fermée de la décennie 1965-1975 s'ouvre et multiplie ses référents identitaires, ce qui a tendance à brouiller la lecture de l'espace social. Il serait difficile de dire si le brouillage repéré dans cette thèse correspond au phénomène général que l'on nomme l'avènement d'une société de l'information ou à une dissolution effective de la communauté de chimie du solide (mouvement spécifique) ou s'il s'agit d'un artefact produit par la méthode historiographique adoptée. Mais il m'a semblé opportun de conserver la même grille de lecture sur toute la période étudiée et de continuer à mettre au premier plan les groupes humains. C'est pourquoi à la période centripète de formation d'une communauté succède une période centrifuge de diaspora.

Trois niveaux d'analyse.

J'ai placé l'analyse à trois niveaux spatio-temporels et institutionnels différents : la vie de laboratoire ; la politique scientifique verticale ; et l'organisation communautaire horizontale.

²⁷ « Dans [la] métaphore [de l'archipel], les disciplines enseignables seraient, à un moment donné, représentées par ces "lignes de navigation" que dessinent les vaisseaux cabotant d'île en île au sein de cet *archipel de la connaissance*, itinéraires "familiers, quotidiens, ordinaires [...]" parcourus des milliers de fois dans les deux sens." [Le Moigne, 1997, p. 167-168].

La vie de laboratoire : du quotidien aux cycles décennaux.

Je suis parti du savoir local dans un espace confiné, le laboratoire, pour coller au plus près des pratiques micro-sociales suivant une dynamique ascendante, dite « *upstream* ». ²⁸ Plus particulièrement, je pose deux types de questions : la création et la transmission des savoirs. Premièrement, étudier la création de connaissance : trouver la place qu'occupent les savoir-faire propres – sont-ils d'ailleurs tous explicitables? – et l'influence qu'exerce l'instrumentation au sein d'un espace cognitif réduit dans lequel science et technique semblent intégrées l'une à l'autre. La chimie du solide offre à cet égard deux terrains propices. En synthèse chimique ou pour la caractérisation physique, la technique est au cœur du savoir-faire revendiqué, soit conçue puis mise en routine, soit importée puis adaptée. Comment qualifier cette instrumentation protéiforme? Quelle indépendance peut être accordée à un savoir (dit) « universel » alors qu'il est extrait d'un instrument, localement inscrit dans la matière et globalement normalisé par la communauté [Joerges & Shinn, 2001] ?

Deuxièmement, outre la production, c'est l'échange de connaissances qui m'intéresse, en particulier l'apprentissage et la transmission de savoirs et savoir-faire. Au sein du laboratoire, il s'agit alors de décortiquer le fonctionnement de groupes structurés autour d'un dualisme savoir/pouvoir. ²⁹ Cette approche locale offre au moins trois déclinaisons de la conception de la hiérarchie et ses évolutions dans la société française (par rapport à des événements comme Mai 68 par exemple) : vieux/jeunes, chercheurs/techniciens, hommes/femmes.

- La relation maître-élève, étape cruciale des processus d'apprentissage et de création, évolue radicalement d'une polarisation forte mandarin→pupille à une relation plus interactive chercheur↔étudiant.
- S'intéresser à la place qu'occupent les techniciens travaillant dans l'ombre des chercheurs permet de mettre en évidence la face cachée de la science. Pourquoi les techniciens sont-ils le plus souvent absents des écrits de la communauté alors qu'ils participent à la production des savoirs? Où les techniciens cherchent-ils une reconnaissance sociale et comment ne l'obtiennent-ils pas ?
- Repérer la position des femmes dans l'espace confiné d'un laboratoire permet d'identifier des représentations culturelles caractéristiques d'une époque.

Pour aborder les questions de hiérarchie, d'échange et de création des savoirs, je choisis la thèse comme moment-clé de la vie d'un laboratoire universitaire de chimie, français et contemporain. C'est par ce biais que j'essaierai de dégager les thèmes de recherche du laboratoire comme des cycles pluriannuels en m'efforçant de repérer les multiples facteurs – contingents ou socialement déterminés – qui provoquent le lancement ou l'arrêt des cycles. Il s'agira alors de distinguer les « forces centripètes » obéissant aux logiques internes, de valorisation des savoir-faire ou des instruments, des « forces centrifuges » dues aux pressions externes ou aux tensions internes au laboratoire.

²⁸ Le terme « *upstream* » [Gieryn, 1999, p. ix] qualifie l'approche des sociologues du laboratoire qui, à la suite des travaux de Merton, Barnes, et Collins s'attachent à comprendre les sciences de l'intérieur par la construction locale des connaissances. Toutefois, je ne prétends pas atteindre la précision de l'« ethnométhodologie ».

²⁹ Le dualisme entre les dimensions cognitive et sociale peut être rendu par l'expression « *epistemic authority* » que [Gieryn 1999, p. 1] définit (d'ailleurs, de manière peu claire) comme une « domination légitimée » (empruntée à [Weber, 1978, p. 212]) par le rapport au savoir.

La politique scientifique verticale : public/privé, université/industrie, fondamental/appliqué.

En inversant la perspective, les sciences peuvent être conçues comme une partie d'un ensemble culturel plus vaste. En suivant une dynamique descendante ou « *downstream* », ³⁰ le laboratoire devient le nœud d'un « réseau sociotechnique » [Calon & al., 1986] gouverné par des enjeux nombreux et délocalisés au delà du savoir local. Soumis à ce réseau hétérogène, le laboratoire alternativement utilise/est utilisé par chacune des « logiques » qui sous-tendent les ramifications. « Ces logiques [sont] autonomes, mais non indépendantes, les unes des autres » [Jacq, 1998, p. 12]. Pour un laboratoire de chimie du solide, on peut répartir ces logiques en deux grands ordres : l'exigence de crédibilité académique et l'objectif d'applications industrielles. Très schématiquement, pour la France, l'avant est essentiellement soutenu au sein de l'Université ; le revers est encouragé par les organismes publics (CEA, DGA, CNES...), les choix politiques (nucléaire, armement, espace...) nationaux et internationaux (OCDE, OTAN, ASE...), les intérêts privés (CGE, Saint-Gobain, Rhône-Poulenc...).³¹ La multiplicité des enjeux soumet les laboratoires académiques à de multiples choix stratégiques de financement, d'alliances, de recrutements, de thèmes de recherche, de développements instrumentaux.

À partir de cette pluralité de logiques, je pose deux types de questions. Premièrement, comment évolue la dépendance des laboratoires (et des équipes de recherche) de chimie du solide dans un monde en mutation, qui favorise telle ou telle logique au cours du temps (projets étatiques des Trente Glorieuses et de la guerre froide, néo-libéralisme...) ? Ici encore, l'équilibre entre forces « centripètes » et « centrifuges » sera déterminant. Comment l'industrie privée ou publique va-t-elle influencer la recherche académique ? Réciproquement, dans quelles mesures les chimistes du solide français participent-ils à l'innovation technologique par la production de matériaux, le dépôt de brevets ou le lancement de *start-up* ? Subséquemment – et ce sera la deuxième interrogation – comment des laboratoires directement soumis à la demande utilitaire peuvent-ils poursuivre des recherches fondamentales ? La chimie du solide offre un cas particulier où le tissage fondamental/appliqué est extrêmement dense. Comment au sein de ce maillage interactif serré la démarcation fondamental/appliqué opère-t-elle ? Ce tissu spécifique pourrait disqualifier la séparation nette, parfois vite acceptée, entre une recherche fondamentale indépendante et une technologie appliquée soumise aux logiques industrielles. La complexité du lien entre chimie et industrie a déjà été soulignée pour le dix-neuvième siècle, en Europe [Homburg & al., 1998], pour le vingtième siècle, aux États-Unis [Kendall, 1979 ; N'Diaye, 2001], ou en France [Le Roux, 1998], mais assez rarement en partant de la sphère universitaire [Pestre, 1990].

La perspective horizontale : instrumentation, discipline et style national.

³⁰ La dynamique « *downstream* » est à nouveau empruntée à Gieryn [1999, p. ix] qui revendique cette approche comme plus pertinente que la version « *upstream* » pour comprendre la crédibilité scientifique : « *Possibly the time is ripe for sociologists to look at science from a different vantage – not upstream at facts in their making, but downstream at their consumption.* »

³¹ La « logique » ne renvoie ni à la logique formelle, ni à la rationalité mais désigne un système d'intérêts liés à un groupe formel (institution) ou informel, qui s'exprime par des actions et/ou une rhétorique. Un individu qui appartient à une institution est partiellement pénétré par la logique de son institution même si cette appartenance peut lui laisser une large autonomie. Par exemple, les chercheurs du CEA peuvent être plus reconnus au niveau universitaire international que leurs homologues du CNRS sur quelques sujets particuliers (liés au nucléaire).

La chimie du solide française revendique son existence en tant que communauté scientifique structurée intérieurement et ouverte sur l'extérieur. Concrètement, qu'entend-t-on par extérieur ? Premièrement, au niveau disciplinaire : la chimie du solide se construit par échanges successifs avec divers blocs disciplinaires déjà constitués mais en mutation : céramique, cristallographie, métallurgie, minéralogie, physique des solides, télécommunications... Les échanges sont soit collectifs (au cours de congrès communs par exemple), soit individuels (entre équipes). L'existence de collaborations étroites entre laboratoires – en particulier entre physiciens et chimistes – interroge la nature de ces échanges disciplinaires : « multidisciplinaire », « interdisciplinaire » ou « transdisciplinaire » ?³² En particulier, elle met en question la nature de l'objet étudié : quand physiciens et chimistes collaborent sur un composé comme les bronzes de vanadium étudient-ils le même objet socio-cognitif ? L'éclairage nouveau apporté par ces interactions positives entre physique et chimie permettra de reconsidérer leurs relations complexes, souvent senties comme inégales, et mettra en perspective plusieurs représentations du monde. Quelle vision le chimiste a-t-il de l'état solide par exemple ?

Deuxièmement, au niveau instrumental : que ce soit au travers des caractérisations mais aussi par les calculs et la modélisation (informatique), la chimie du solide est modélisée par les instruments. Dans quelles mesures ces interactions sont-elles constitutives d'une discipline contemporaine ? Au sein de ce processus, la « *big science* » constitue-t-elle une source d'innovation déterminante ou un simple gadget technologique hors de prix ? Les études de cas confrontant chimie et instrumentation sont nombreuses mais portent rarement sur la période d'après-guerre, pourtant fortement marquée par le renouveau instrumental [Van Helden & Hankins, 1994 ; Buchwald & al., 1998 ; Morris, 2002]. La chimie du solide rend compte du mouvement de « *physicalization* »³³ de la chimie.

Troisièmement, au niveau international : la communauté française se construit en revendiquant une spécificité – et même une primauté – par rapport aux mondes anglo-saxon et germanique en se posant comme modèle pour les autres. Cette revendication est à l'opposé du schéma accepté pour la physique française par exemple, qui imite le modèle américain [Pestre, 2004]. Cette perspective permet de s'interroger sur la pertinence du cadre national pour étudier les sciences contemporaines, qui s'inscrivent dans une dynamique internationale. Sans souscrire au nationalisme d'une histoire des sciences comme celle de Duhem qui distinguait un « esprit germanique », un « esprit anglais » et un « esprit français », on ne peut davantage nourrir l'illusion d'un esprit scientifique universel, qui s'actualiserait dans l'histoire, détaché

³² J'emprunte la définition des termes à deux auteurs d'un numéro de la *Revue du Mauss* de 1997 intitulé *Guerre et paix entre les sciences. Disciplinarité, inter et transdisciplinarité*. Pour Morin [1997, p. 28], la « polydisciplinarité [que je remplace par « multidisciplinarité » pour des raisons formelles de non-mélange latin-grec] constitue une association de disciplines autour d'un projet ou d'un objet qui leur est commun [...] l'interdisciplinarité peut signifier tout simplement que différentes disciplines se réunissent... sans pouvoir faire autre chose qu'affirmer chacun ses propres droits... [mais] peut aussi vouloir dire échange et coopération, et devenir ainsi quelque chose d'organique [...] la transdisciplinarité se caractérise souvent par des schèmes cognitifs traversant les disciplines, parfois avec une virulence telle qu'ils les mettent en transe. »

Pour de Béchillon [1997, p. 185-187], la « pluridisciplinarité [...] suppose une simple *juxtaposition* des regards spécifiques à chaque discipline. Ce procédé de l'addition pure et simple maintient l'hétérogénéité des "points de vue" produits sur le même objet. [...] pour l'interdisciplinarité [...], il s'agit cette fois d'une *articulation* de savoirs, qui entraîne, par approches successives, comme dans un dialogue, des réorganisations partielles des champs théoriques en présence. [...] la *transdisciplinarité* [...] posture par laquelle] on tente d'abandonner les points de vue particuliers de chaque discipline pour produire un savoir autonome d'où résultent de nouveaux objets et de nouvelles méthodes. Il s'agit cette fois d'une *intégration* des disciplines. »

³³ "I understand the introduction of physical methods in chemistry as a development that has to be seen in comparison and in analogy with other cases of a similar type in the sciences since around 1800. I call the general movement *Physikalisierung (physicalization)*, and define it as the introduction of instruments--generating numerical data, which are interpreted in terms of physical entities and theories--into various other sciences and technologies." [Reinhardt, 2006, p. 26].

des contingences [Nye, 1993]. Il s'agit donc d'analyser comment des énoncés scientifiques se stabilisent et s'universalisent. Néanmoins, rechercher les spécificités françaises et les points de convergence internationale est d'autant plus délicat qu'il n'existe pas encore d'histoire internationale de la *Solid State Chemistry*. Seules quelques études centrées sur le monde anglo-saxon portent sur les *Materials science & engineering* et la *Solid State Physics*.³⁴ Il s'agira de proposer quelques tendances simples entre France et Europe, puis entre Europe et États-Unis.

Ces trois niveaux d'interaction avec l'extérieur définissent par contraste un intérieur plus densément structuré en réseaux d'individus, de laboratoires et de communautés. Par souci de clarté, je distinguerai par la suite divers niveaux d'interaction. Un des objectifs central de la thèse consiste à repérer l'organisation synchronique des acteurs « humains » et « non-humains » [Latour, 1989] puis d'en suivre les évolutions diachroniques au cours de la période 1950-2000. Cet exercice procédera par aller retour entre le local (individu, laboratoire) et le global (groupe, nation). Un thème de recherche pourra servir de courroie de transmission entre le laboratoire avec ses cycles et la communauté avec ses modes. Dans sa dynamique, la communauté va essayer de se stabiliser en tant que discipline. On sait que les rites de la commémoration [Abir-Am & Elliott, 1999] et l'écriture d'histoire disciplinaire [Graham & al., 1983] constituent de bons moyens de stabilisation. Mais, préalablement, l'enseignement constitue l'un des éléments-clés parce qu'il assure la reconnaissance et l'apprentissage auprès des étudiants d'un corpus constitué de savoirs. Si la chimie du solide forme une discipline, alors on s'attend à ce que sa construction s'appuie sur le développement d'un enseignement correspondant. Dans la compétition entre centres de recherche, l'enseignement et la pédagogie sont aussi des outils stratégiques pour recruter des étudiants. Les logiques de recrutement à l'œuvre sont-elles régies par l'opposition typique entre écoles d'ingénieurs et universités ou par des considérations plus locales, propres à chaque laboratoire ? L'enseignement peut aussi jouer un troisième rôle en tant que dynamique interne à la discipline, comme espace créatif stimulant le chercheur (qui doit apprendre pour enseigner mais aussi classer, chercher des analogies, construire une unité disciplinaire).

En résumé, la communauté, réseau horizontal, servira de clef de voûte connectant les logiques ascendantes (internes aux laboratoires) aux logiques descendantes (industrie, politique) et de pierre angulaire confrontant les pratiques locales (savoir/pouvoir, relations humaines et divisions du travail), la stabilisation de savoirs locaux devenant universel et les évolutions culturelles globales (Mai 68, système éducatif). Elle sera le fil conducteur du récit historique sur la période 1950-2000.

Organisation du récit et vue d'ensemble

Ce travail de thèse cherche à montrer l'émergence d'une discipline scientifique contemporaine, la « chimie du solide », dans un contexte national particulier, et s'efforce d'interpréter ses évolutions historiques entre 1950 et 2000. Il s'agit de décrire la construction simultanée d'un objet d'étude (le solide) et d'un champ de recherche (chimie du solide) à travers l'émergence d'une communauté scientifique. Chacun des trois éléments – objet,

³⁴ Pour des histoires récentes de la science des matériaux et de la physique du solide dans le monde anglo-saxon, on pourra se référer aux travaux « contextualistes » : [Bensaude, 2001 ; Bensaude & Hessenbruch, 2004], « internalistes » : [Hoddeson & al., 1992] et « whiggish » : [Cahn, 2001].

champ, communauté –, qui redéfinit en permanence les deux autres, participe à la création d'identités multiples et façonne le profil d'un chimiste qu'on appelle « *solidiste* ».

Le plan distingue trois périodes : l'immédiat après-guerre sert de base pour présenter l'état solide comme objet de recherches en sciences expérimentales (première partie) ; la période 1950-1980 montre comment la chimie du solide émerge grâce aux dynamiques communautaires de créations et d'exclusions (deuxième partie) ; enfin, la période 1970-2000 suit l'ouverture de la communauté et l'évolution centrifuge de la diaspora (troisième partie).

Après la Deuxième Guerre mondiale, l'état solide est pensé comme un unique état de la matière. En France, son étude est fragmentée en de multiples disciplines universitaires – physique, métallurgie, cristallographie, chimie – et industries des matériaux – verres, céramiques, métaux – (chapitre I). En chimie, les groupes étudiant les solides sont transversaux par rapport aux sous-disciplines universitaires. Au sein de la chimie minérale, ils s'imbriquent selon des strates superposées : famille scientifique, groupe thématique interstitiel, collège invisible. La chimie de l'état solide, le plus vaste des collèges invisibles, se déploie sur l'échiquier européen et cherche à embrasser tous les solides, de l'organique au minéral, de la surface au volume, du fondamental à l'appliqué. (chapitre II). Au cours des années cinquante puis soixante, le monde universitaire enfle, se régionalise – Paris perd sa position hégémonique – et se spécialise. De plus en plus de minéralistes se rencontrent autour des cristaux ioniques et des hautes températures. En synthétisant de nouveaux solides cristallins, ils intensifient leurs collaborations avec les industriels et avec les physiciens. Mettant en commun des techniques (haute température, diffraction des rayons X), des intérêts (valeur et pouvoir) et une histoire (mythe fondateur), ils se reconnaissent bientôt comme une communauté de chimie du solide. Le rêve continuiste de la chimie de l'état solide est brisé. À une identité communautaire forte (chapitre III) correspondent des hétérogénéités locales : chaque laboratoire issu des grandes familles de la chimie minérale garde une spécificité et constitue un pôle irréductible assimilable à une école de recherche (chapitre IV). Certains, intégrés à la chimie minérale des années cinquante, sont désormais considérés comme déviants par rapport à la matrice disciplinaire et sont exclus de l'horizon communautaire au cours des années soixante-dix (chapitre V). La communauté s'est institutionnalisée et, semble-t-il, stabilisée. Mais de nouveaux foyers hétérodoxes se multiplient à partir des années soixante-dix. Ils développent des synthèses inédites à basse température (contre le dogme des hautes températures), fabriquent des solides non cristallins (contre le dogme cristallin) et ont recours à une instrumentation sophistiquée (contre l'hégémonie des rayons X). Simultanément, une réorganisation administrative marque un changement d'époque (chapitre VI). Certains laboratoires ont réussi à trouver des appuis industriels puissants pour contourner la pression communautaire qui les étouffait. Ils parviennent parfois à concilier recherches fondamentales et appliquées (chapitre VII). Malgré des singularités nationales, la chimie du solide se développe en Europe dans des circonstances voisines à celles de la France. À la fin des années soixante-dix, les communautés françaises et allemandes vont œuvrer à la mise en place d'une communauté européenne. L'Europe, en faisant le choix d'une recherche académique disciplinaire, favorise une approche multidisciplinaire efficace. En cela, elle se distingue du cas américain, modèle centré sur la science des matériaux et l'interdisciplinarité qui fascine la classe politique et les industriels (chapitre VIII).

Première partie.

*L'état solide comme objet de recherches
en sciences expérimentales (1950)*

Chapitre I.

État solide en France :
construction institutionnelle, organisation
territoriale et structuration disciplinaire.

Chapitre I. État solide en France : construction institutionnelle, organisation territoriale et structuration disciplinaire.	27
<i>Introduction</i>	29
<i>I.1. Développement de la recherche scientifique publique entre fondamental et appliqué.</i>	30
<i>I.2. Recherches sous tutelle du ministère de l'Éducation nationale</i>	31
I.2.1. Splendeurs mandarinales des facultés des sciences	31
I.2.2. Misère de la recherche et stabilité de l'enseignement en écoles d'ingénieurs	34
I.2.3. Essor du CNRS : marges de manœuvre et modes d'intervention	36
<i>I.3. L'état solide dans les sciences expérimentales (hors chimie).</i>	41
I.3.1. Quelques porte-parole communautaires de l'état solide	42
I.3.2. Antinomie du solide : de la continuité philosophique à la rupture sociale ?	45
<i>Conclusion</i>	52

Introduction

Année mille neuf cent quarante-cinq, le monde sort de six ans de conflit total. En France, quatre années d'occupation ont bouleversé le pays. La production industrielle est faible. Tous les biens matériels sont rationnés. Pour pallier le manque de biens de consommation, le gouvernement provisoire choisit une politique d'intervention de l'État dans l'économie nationale et lance une planification quinquennale. Le Commissariat au plan, dirigé par Jean Monnet, devra gérer sa mise en œuvre. Le premier Plan, dit « de modernisation et d'équipement », fixe les objectifs nationaux pour les années 1946-1951 et sert de feuille de route pour les gouvernements à venir. Élaboré en 1945-46, alors que les tickets de rationnement circulent encore au sein de la population, le Plan vise surtout à la reconstruction du pays et l'augmentation de la production matérielle [Bidault, 1993, p17]. La recherche scientifique publique n'y est pas mentionnée, elle ne constitue pas une priorité nationale. Pourtant elle existe encore. Ses structures sont héritées de la III^e République mais elle s'est modifiée au cours des années de guerre, d'occupation et de collaboration. Comment se présente-t-elle après-guerre sur la période 1945-1950 ? Quelle est son organisation institutionnelle ? Comment s'articulent ses différentes composantes ? Quelle est sa situation pour les sciences expérimentales ?

Ce premier chapitre vise un double but. En partant du système d'avant-guerre, il trace de manière succincte les grands traits de la recherche publique française après-guerre (I.1). Les exemples utilisés pour rendre le récit plus vivant sont essentiellement empruntés à la chimie (I.2). Dans un deuxième temps, il s'agira de montrer que l'étude des solides en sciences expérimentales n'offre pas un visage homogène ni unifié mais qu'elle répond à une multitude de champs scientifiques en interaction : physique, métallurgie, cristallographie, chimie*.¹ Chaque discipline se focalise sur des objets propres et utilise des méthodes différentes (I.3).

¹ Les astérisques repèrent les mots ou expressions répertoriés dans le glossaire à l'usage des non-chimistes (fourni en annexe) lors de leur première occurrence dans le corps du texte (sauf s'ils n'apparaissent qu'en note).

I.1. Développement de la recherche scientifique publique entre fondamental et appliqué.

Durant la première moitié du vingtième siècle, l'État a graduellement mis en place des institutions publiques pour dynamiser la recherche scientifique : Caisse des recherches scientifiques (1901), Direction des inventions militaires (1915) puis industrielles (1919), Caisse nationale des sciences (1930), complémentaire de la Caisse des recherches scientifiques, puis Centre national de la Recherche scientifique appliquée (CNRSA) (1938). À ces nouvelles institutions d'organisation de la recherche correspond en amont la création de centres politiques de coordination : Conseil supérieur de la recherche (1933), Sous-secrétariat à la recherche scientifique (1936), Haut-Comité de coordination de la recherche de Recherche scientifique (1938). En aval des institutions, l'État a créé des centres de recherche scientifique : Institut de biologie physico-chimique (1926), Laboratoires de Bellevue² puis quelques grands laboratoires à partir de 1937. L'émergence d'une volonté politique dans la gestion de la recherche scientifique se construit pas à pas et sa mise en œuvre est graduelle avec une accélération marquée au moment du Front populaire (1936-1938). Néanmoins, ces diverses institutions publiques disposent de peu de moyens matériels et leur poids réel reste faible. Leur intervention consiste principalement à accorder des crédits ponctuels à des personnalités scientifiques, soit par des bourses d'étude, soit sous forme d'équipements pour leur laboratoire.

Les sphères politiques et scientifiques se rapprochent pourtant : les politiques se montrent plus soucieux du développement de la recherche tandis que les scientifiques interagissent plus avec le monde politique. Cette phase initiale d'institutionnalisation saccadée de la recherche trouve une première cohérence en 1939 par la création du Centre national de la recherche scientifique (CNRS). En effet, le nouvel organisme a pour but « d'animer le développement de la recherche scientifique et de coordonner les travaux qui s'y rapportent », en un mot de diriger l'ensemble des recherches publiques françaises.³ Cependant, pour de multiples raisons, le CNRS n'a pas obtenu les moyens d'une politique scientifique unifiée et n'est pas devenu un ministère de la Recherche [Prost, 1988]. Il demeure sous la tutelle du ministère de l'Éducation nationale, qui lui n'a aucune politique de recherche cohérente. Malgré des statuts ambitieux, le Centre ne dispose pas de « pouvoir réel lui permettant d'agir conjointement sur ses laboratoires et sur la recherche universitaire » [Bidault, 1993, p18]. Aussi, à partir de 1942, les diverses administrations de l'État créent leur propre organisme de recherche dans le but de poursuivre des recherches appliquées répondant à des besoins spécifiques et ciblés.⁴

² « Le domaine de Meudon Bellevue appartenait à la danseuse américaine Isadora Duncan, elle l'avait légué à sa mort au Bureau des inventions qui y avait installé quelques laboratoires techniques, sur la bicyclette, la photographie et une station d'essais de moteurs. Le CNRS [...] a hérité du Bureau des Inventions et donc du terrain de Meudon. » [I Caro, 2002, p4]. Le terrain de Meudon-Bellevue a aussi été utilisé pour monter l'électroaimant de l'Académie des sciences par Aimé Cotton [Shinn, 1993]. À partir de 1928, les Laboratoires de Bellevue remplacent l'Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions puis constituent après-guerre le plus important groupement des laboratoires rattachés au CNRS [CNRS, 1947, p8].

³ Une chronologie détaillée et claire de l'institutionnalisation de la recherche française est donnée par Bidault [1993, pp87-90]. Les créations successives des divers organismes sont racontées par Picard [1990, chapitres I et II] dans un souci d'explication de la genèse du CNRS. Les statuts juridiques du CNRS, en particulier le décret du 19 octobre 1939, sont analysés par Druesne [1975].

⁴ « Les années suivant [la création du CNRS] voyaient l'installation d'organismes "concurrents" dans les grandes administrations. En 1942, pour la santé publique, l'*Institut National d'Hygiène* [ancêtre de l'INSERM], pour les

En résumé, jusqu'en 1950, les politiciens au pouvoir se convainquent peu à peu de la nécessité pour le pays de se doter d'une recherche scientifique publique et du rôle que doit jouer l'État dans son organisation. Les changements de gouvernements,⁵ les conceptions variées des politiciens en matière de recherche et l'influence variable des scientifiques expliquent la création d'un paysage hétéroclite et désordonné. L'administration de la recherche en France ne suit pas un plan d'ensemble préétabli mais se construit par retouches successives au fil du temps sous l'emprise d'acteurs multiples. En 1950, trois types d'organisations coexistent de manière peu coordonnée :

- 1) des organismes à vocation appliquée, liés à un champ scientifique spécifique et dépendants d'un ministère donné ;
- 2) un centre de recherche à vocation unificatrice, le CNRS ;
- 3) des lieux de recherche à vocations multiples, les laboratoires des universités et des écoles d'ingénieurs.

Faire un état des lieux exhaustif du système de recherche public dépasse largement le cadre de cette étude. Je me focalise donc par la suite (I.2) sur les seuls centres dépendants du ministère de l'Éducation nationale. Les organismes à vocation appliquée en particulier apparaîtront par ailleurs de manière ponctuelle lorsqu'ils croiseront la route des laboratoires universitaires.

I.2. Recherches sous tutelle du ministère de l'Éducation nationale

Dans l'imbroglio administratif du système de recherche français, il y a un ministère qui détient une position centrale par le nombre de centres de recherche dont il a la charge et par l'effort scientifique qui s'y déploie, celui de l'Éducation nationale. Ministère de tutelle du CNRS, de l'Université et des grandes Écoles, il gère administrativement une large part de la recherche publique française. Paradoxalement, il ne suit pas de politique scientifique définie. Chacune des entités sous sa tutelle est quasi-indépendante des autres et au sein de chaque entité les laboratoires possèdent une grande marge de manœuvre. Passons en revue pour les sciences expérimentales la situation propre à chaque entité – facultés des sciences, écoles d'ingénieurs, CNRS – autour de 1950.

I.2.1. Splendeurs mandarinales des facultés des sciences

La guerre n'a que légèrement modifié une recherche universitaire préexistante. Entre-deux-guerres,⁶ l'Université regroupe déjà une large part des laboratoires de recherche

colonies, l'ORSTOM ; l'IRSID pour la sidérurgie et l'Institut français du pétrole pour l'énergie en 1943 ; pour les télécommunications le CNET en 1944 ; le CEA pour l'énergie atomique en 1945 ; pour l'aéronautique, l'ONERA, et l'INRA pour l'agriculture en 1946 etc. » [Bidault, 1993, p16 et p33].

⁵ Les changements gouvernementaux proviennent non seulement de renversements gouvernementaux au sein d'un régime mais encore d'une succession houleuse de régimes : fin de la III^e République, période de Vichy puis début de la IV^e République.

⁶ Pour avoir un tableau général de *La République des universitaires (1870-1940)*, on pourra se reporter à [Charle, 1994]. Pour une description plus particulière, on pourra consulter *Physique et physiciens en France 1918-1940* [Pestre, 1984].

publique. Ceux-ci coexistent sans coordination forte au sein de facultés des sciences, elles-mêmes rattachées à des universités peu directives. Si via le ministère il existe un centralisme administratif et un corps de métier unique – les enseignants sont fonctionnaires –, il n'existe pas de coordination des universités en ce qui concerne la recherche scientifique. Chaque directeur de laboratoire, qui est aussi professeur et vice-versa, dispose d'une large liberté de manœuvre dans le choix des thèmes de recherche. Au sein de son laboratoire, il est hiérarchiquement le seul à décider. Vis-à-vis de l'extérieur, le laboratoire est impliqué dans divers réseaux socio-techniques qui déterminent plus ou moins son action : industries privées, organismes d'État (en particulier les militaires), recherche internationale, sociétés savantes...

Après-guerre, la communauté universitaire est de taille modeste. Elle regroupe dix-sept universités réparties sur l'ensemble du territoire.⁷ Sa population est probablement proche de celle d'avant-guerre. Or, en 1938, on comptait soixante mille étudiants en France. Pour l'année 1950, le nombre d'enseignants des universités est proche de trois mille cinq cents [Renaut, 1995, p. 39]. La faible densité de population du territoire favorise la domination de quelques mandarins. La communauté des sciences expérimentales se présente comme un patchwork de « familles scientifiques » dont la taille varie des limites du laboratoire à celle d'un vaste empire académique. La figure du mandarin y est prépondérante. La reconnaissance individuelle des grands hommes est survalorisée par rapport au travail collectif qui se déroule à l'ombre des murs du laboratoire. Les contacts entre empires – pas toujours diplomatiques – s'opèrent essentiellement à travers les mandarins. Ceux-ci se connaissent tous et se rencontrent fréquemment au sein des institutions scientifiques qu'ils écrasent : universités, CNRS, sociétés savantes, Académie des sciences, Collège de France, commémorations ponctuelles... La Sorbonne constitue l'université par excellence. Son attrait symbolique est prépondérant.⁸ Paris draine 80% des crédits que le CNRS affecte à l'ensemble des laboratoires universitaires, la Sorbonne représente à elle seule 70% de ces crédits nationaux [RA CNRS, 1953, p. 45]. Les familles scientifiques ont d'autant plus de relations de concurrence mais aussi d'intérêts communs qu'elles appartiennent aux mêmes disciplines : biologie, chimie, physique... puis sous-disciplines : chimies analytique, minérale, générale, organique...⁹ Les sous-disciplines demeurent assez perméables entre elles. Au cours de leur carrière, les professeurs peuvent enseigner différentes matières et occuper diverses chaires suivant la faculté où ils sont nommés en fonction des places disponibles.¹⁰

⁷ Par ordre alphabétique, ces universités sont celles de : Alger, Besançon, Bordeaux, Caen, Clermont-Ferrand, Dijon, Grenoble, Lille, Lyon, Marseille, Montpellier, Nancy, Paris, Poitiers, Rennes, Strasbourg, Toulouse [RA CNRS, 1953, p. 45].

⁸ Cette fascination pour la Sorbonne est mise en évidence par le fait que la plupart des mandarins cherchent à y obtenir un poste de professeur (la réciproque est d'ailleurs valable : les professeurs de la Sorbonne sont des mandarins). Par exemple, la chaire de « chimie générale » de la Sorbonne est successivement occupée par : Henry Moissan (jusqu'en 1907), Henry Le Chatelier (1907-1925) [Leicester, 1981] puis par Paul Pascal, Louis Hackspill et Paul Job [Chrétien, 1950, p. 5]. D'autre part, en suivant les trajectoires individuelles des mandarins, on remarque souvent un aller-retour Paris-province-Paris. Par exemple, Georges Chaudron effectue sa thèse à la Sorbonne dans le laboratoire de Le Chatelier (1913-21) puis occupe divers postes d'assistant dans des laboratoires parisiens : Collège de France, École des Mines (1921-28) avant d'obtenir la chaire de « chimie industrielle » de Lille (1928-1939) où il succède justement à Pascal, plus ancien, nommé à la Sorbonne. En 1939, il est nommé « professeur sans chaire » (1939-1947) à la Sorbonne puis titulaire de la chaire de « chimie appliquée » [Chaudron, 1954, p. 5 ; Cornet, 1989].

⁹ Cette classification disciplinaire – non exempte de hiérarchisation positiviste – est issue de l'enseignement universitaire d'avant-guerre. Les enseignements sont répartis en « certificats » : « P.C.B. » (Physique, Chimie, Biologie), « M.P.C. » (Mathématiques, Physique, Chimie). Chaque certificat contient des sous-disciplines qui correspondent au titre des chaires : « chimie appliquée », « chimie minérale », ... [Chrétien, 1951, p. 5] et [Chaudron, 1954, p. 5-6].

¹⁰ Par exemple, lorsqu'en début de carrière Chrétien est « chargé de cours », il participe « à tous les enseignements de Chimie relatifs aux certificats P.C.B. – S.P.C.N. – M.P.C. – Chimie générale – Chimie appliquée » avant d'obtenir la chaire de « chimie minérale » de la Sorbonne. Par ailleurs, il est professeur de

Pendant et après-guerre, l'appareil universitaire tourne au ralenti. La guerre et l'Occupation l'ont vidé de ses personnels titulaires, de ses étudiants et de ses ressources matérielles. Une grande partie des chercheurs et des techniciens de santé et d'âge requis a été mobilisée dès 1939. Après la débâcle de mai-juin 1940, le retour n'a été que progressif.¹¹ Les crédits de fonctionnement ont été drastiquement réduits par l'effort de guerre entrepris de septembre 1939 à juin 1940 puis par l'Occupation, période de pénurie généralisée. Les laboratoires sont vides, sans instruments, sans réactifs. Certains professeurs sans chaire se retrouvent même sans laboratoire et doivent se débrouiller comme ils peuvent.¹²

La recherche ralentit certes mais ne s'arrête pas puisque les professeurs d'université continuent de travailler. C'est un point intéressant que je voudrais souligner : la majorité des professeurs d'université que j'ai rencontrés (chaires de chimie) sont restés en poste pour les cours d'amphithéâtre ou à la direction d'un laboratoire. Même si les situations sont très différentes d'un cas à l'autre, les positions institutionnelles sont d'autant plus instables que les scientifiques sont plus jeunes et moins renommés.¹³ Dans le cas où un professeur est écarté de sa position par les « lois » de Vichy, il est remplacé par l'un de ses collègues.¹⁴ Malgré les

« chimie générale et minérale » aux Écoles normales supérieures de Saint-Cloud et Fontenay-aux-Roses. [Chrétien, 1950, p. 3-5].

¹¹ L'exemple des élèves de Chaudron montre des soldats mobilisés en 1939, emprisonnés en 1940 puis progressivement libérés à partir de 1942 [Cornet, 1989, p. 7]. Ce schéma est vraisemblablement général même si le STO (Service du travail obligatoire à partir de juin 1942), la Résistance et les déportations maintiennent un sous-effectif durant toute la période. Le témoignage de Chrétien confirme ce mouvement de va-et-vient des étudiants : deux collaborateurs en 1938 [Chrétien, 1951, p27], un entre septembre 1939 et juin 1940, trois en 1941-42 [Chrétien, 1941], quatre en 1944, cinq en 1945, huit en 1946, douze en 1947 [Chrétien, 1950, p6]. L'un de ses étudiants, Hagenmuller, est déporté en 1943 pour ses activités de résistance à Clermont-Ferrand [Hagenmuller, 1960].

¹² Le cheminement d'André Chrétien durant la période est d'abord intéressant parce qu'il donne une image particulière de la situation générale, entre pénurie et travail scientifique. Nommé « professeur sans chaire » à Strasbourg en 1938, il y dirige un premier laboratoire jusqu'au « début de la guerre ». La « faculté des sciences de Strasbourg [est alors] repliée à Clermont-Ferrand » [Chrétien, 1941]. C'est à Paris que Chrétien participe à l'effort de guerre entrepris par le CNRS [Picard, 1990, chapitre III] en demandant « à M. Longchambon de [l]'affecter au laboratoire de M. le professeur Pascal, qui [lui] a fait l'honneur de [l]'accepter. » Il travaille au laboratoire de la Sorbonne de « septembre 39 à la mi-juin 40 [avec] un [seul] collaborateur régulier : [s]on assistant de Strasbourg : Rohmer [...] mis en disponibilité par l'autorité militaire pour des raisons graves de santé. [...] aussitôt après l'armistice du 25 juin [il reprend] [s]on poste » à Clermont-Ferrand. Il y crée un deuxième laboratoire, « petit laboratoire » avec « trois jeunes collaborateurs » et « un mécanicien » [Chrétien, 1941]. Enfin, nommé « chargé de cours » en 1942, à Paris, il quitte Clermont-Ferrand « en mars 1943 » pour prendre la direction du « Service de la 3^{ème} Section du P.C.B » (Physique, Chimie, Biologie) de la Sorbonne. Il décrit la situation : « Le laboratoire était absolument vide et démuné de tout moyen de travail. Nous avons, avec mes dévoués élèves, équipé ce laboratoire ; cependant les circonstances étaient aussi défavorables que possible. » [Chrétien, 1950, p. 6]. Au-delà du côté misérabiliste d'un texte écrit par un scientifique voulant obtenir un poste d'académicien en montrant le travail qu'il a réalisé, ce récit décrit une situation de recherche difficile et aléatoire à une époque où elle est considérée comme superflue.

¹³ Les péripéties académiques de Chrétien durant la guerre constituent un contrepoint intéressant à la stabilité institutionnelle de Chaudron ou de Pascal. Moins renommés qu'eux (Pascal a déjà écrit le premier « *Pascal* », Chaudron est connu pour ses « diagrammes du fer »), plus jeune qu'eux (huit ans de moins que Chaudron), trop vieux pourtant pour être mobilisable (quarante ans en 1939), Chrétien change trois fois de position, géographique et académique, alors que Chaudron et Pascal ne quittent pas la Sorbonne entre 1939 et 1945.

¹⁴ C'est probablement en raison d'un âge trop avancé que les professeurs d'université n'ont pas été mobilisés au même titre que leurs élèves, sauf si, comme Marc Bloch, ils en ont fait la demande expresse [Bloch, 1990]. Quand les mesures discriminatoires – « raciales », misogynes et politiques – du régime de Vichy les écartent de leur chaire, ils sont remplacés par leurs collègues. Par exemple, en 1942, lorsque Mme Ramart-Lucas, titulaire de la chaire d'« Analyse et de Mesures chimiques » de la Sorbonne, est « mise à la retraite par Vichy, conformément aux dispositions concernant le travail féminin » [Ramunni, 2000], c'est Chaudron qui est nommé « chargé de cours » de 1942 à 1945 pour la remplacer [Chaudron, 1954, p. 5]. Cornet [1989] suggère que Ramart-Lucas est écartée pour raisons politiques.

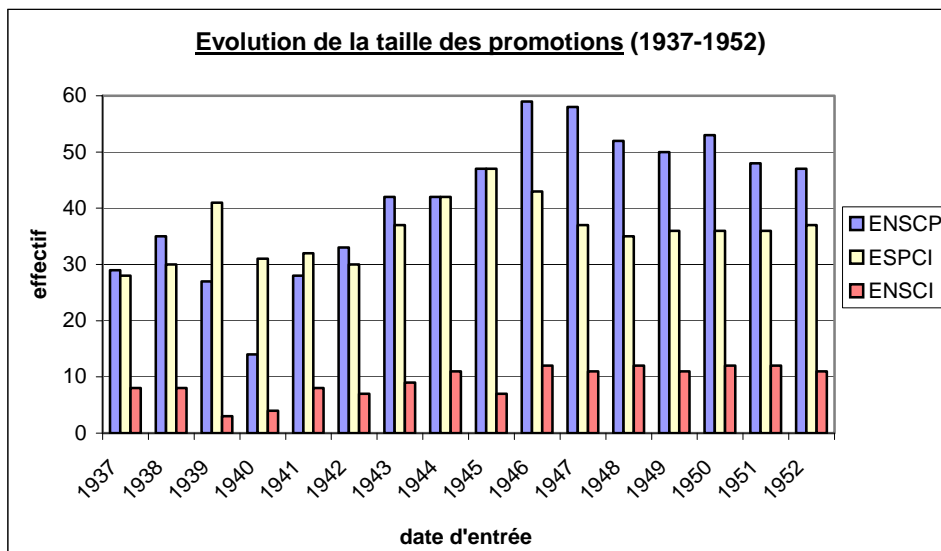
aléas de la période, la pérennité institutionnelle, si ce n'est toujours individuelle, est assurée sans vacance. Les professeurs d'université traversent donc la période de troubles sans perdre leurs pouvoirs, mais le territoire sur lequel ils règnent est devenu plus vide, plus pauvre et moins organisé. Ce faisant, ils ont certainement accru leur pouvoir relatif au sein de la communauté. En effet, contrairement aux chercheurs mobilisés, ils ont continué leurs recherches. Même avec peu de moyens et de personnels, ils ont publié, recruté de nouveaux étudiants ayant fini leurs études pendant l'Occupation. Ils ont reçu des promotions, des médailles, ont occupé des postes nouveaux, ont parfois eu des opportunités de mouvements. Ils ont ainsi accru leur zone d'influence respective puisque face à eux, le monde académique s'est dépeuplé par départs temporaires ou définitifs. En moyenne, leur carrière institutionnelle s'est pérennisée et même confortée alors que celle de la plupart de leurs élèves a subi une rupture académique plus ou moins longue.¹⁵ Savoir si la défaite du soldat a pu dynamiser la carrière du jeune chercheur à son retour reste une question cruciale et ouverte.

Sur la période 1945-1950, le système universitaire français ressemble à un régime féodal oligarchique – il n'y pas de souverain omnipotent – dont la croyance rationaliste défend l'idole de la « science pure ». Le pouvoir y est délocalisé sur une multitude de baronnies, dirigées par des seigneurs sous-disciplinaires. La République n'y pénètre que par la voie administrative de la gestion des carrières et des effectifs à travers le ministère de l'Éducation nationale et non par un projet de politique scientifique mûrement réfléchi.

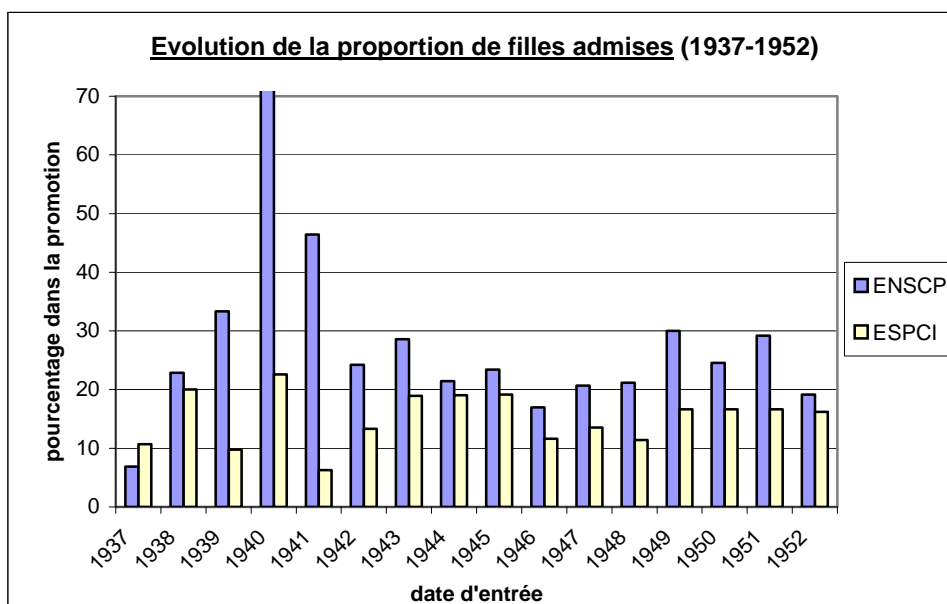
1.2.2. Misère de la recherche et stabilité de l'enseignement en écoles d'ingénieurs

Les écoles d'ingénieurs ont d'abord pour vocation de former des cadres pour l'État et pour l'industrie. Aussi, même si les effectifs des promotions baissent légèrement durant la Deuxième Guerre mondiale, les écoles continuent de fonctionner. J'ai tracé l'évolution de la taille des promotions pour trois écoles d'ingénieurs pertinentes pour l'état solide : l'École nationale supérieure de chimie de Paris (ENSCP), l'École supérieure de physique et de chimie industrielle de Paris (ESPCI) et l'École nationale supérieure de céramique industrielle de Sèvres (ENSCI).

¹⁵ Peut-on dire que les professeurs ont globalement gagné du pouvoir et de la reconnaissance dans la société française au cours de la guerre ? Ce n'est pas sûr : je n'ai pas vraiment de réponse pour la période 1945-1950 mais plutôt quatre remarques emboîtées : 1) le statut de la communauté scientifique change lui aussi au sein de la société, le phénomène n'est pas simplement linéaire, 2) pour la période postérieure à 1950, les études d'histoire et de sociologie montrent unanimement que le statut social de la communauté scientifique augmente, principalement en raison des applications techniques multipliées, 3) par conséquent, les professeurs, juchés au sommet d'une communauté en inflation, vont profiter de cette croissance parce qu'ils ne sont pas renversés, 4) enfin, la guerre peut constituer une des raisons de leur longévité après-guerre puisqu'elle leur permet de conserver leur position privilégiée d'avant-guerre et même d'acquérir une longueur d'avance supplémentaire (ils n'ont pas perdu la guerre en tant que soldats et ont accru leurs positions institutionnelles) par rapport à ceux qui vont les remplacer.



Pour l'ENSCI et l'ENSCP, le recrutement diminue en septembre 1939 et septembre 1940. Les effectifs sont alors divisés par deux par rapport aux effectifs d'avant-guerre : de huit étudiants à trois ou quatre pour l'ENSCI, d'une trentaine pour l'ENSCP à une quinzaine en 1940. Très rapidement pourtant, dès 1941, on revient à des contingents similaires à ceux de 1937. L'ESPCI réussit même à passer les deux rentrées scolaires de 1939 (mobilisation) et de 1940 (défaite) en augmentant ses effectifs. Peut-être est-ce l'effet d'un accroissement des effectifs programmé, finalement interrompu par la guerre ? Quoiqu'il en soit, à partir de 1943, la taille des promotions augmente pour les trois écoles avec un pic entre 1945 et 1946 qui s'interprète comme un rattrapage du manque à gagner induit par le conflit. À la rentrée 1946, l'ENSCP double son recrutement par rapport à celui de 1937 ou 1939 : une soixante d'étudiants sont intégrés. Après la vague de rattrapage (1943-1948), les effectifs se stabilisent à un niveau supérieur à celui d'avant-guerre : +20% à l'ESPCI, +50% à l'ENSCI, +55% à l'ENSCP. Le conflit n'ébranle donc pas vraiment l'enseignement de ces écoles qui continuent de recruter quasiment normalement avec, au pire, une baisse pendant un ou deux ans. L'un des facteurs d'explications se trouve dans la composition des promotions :



Ainsi, l'ENSCP et l'ESPCI décident d'augmenter le nombre d'étudiantes admises en école. Pour l'ENSCP, de trois à quatre avant-guerre (autour de 7% de la promotion), elles sont déjà dix en 1940 (70% de la promotion) puis une douzaine à partir de 1943. Après-guerre, la proportion de filles recrutées se stabilise autour de 20% au début des années 1950. À l'ESPCI, la guerre a provoqué un moins grand bouleversement des habitudes : la proportion d'étudiantes dans les promotions passe de 10% avant-guerre à 17% au début des années cinquante. Il semble bien que l'École instaure un système de quotas à la fin des années quarante puisque, systématiquement de 1949 à 1953, six étudiantes sont admises au concours. Si la guerre permet une ouverture plus large des écoles d'ingénieurs aux filles, ceci n'est pas automatique – l'ENSCI ne recrute pas de fille avant 1974 –, et l'ampleur du recrutement dépend de chaque école – quotas à l'ESPCI –. En assurant une certaine stabilité durant le conflit,¹⁶ le système des grandes écoles permet aux mandarins qui y enseignent de recruter des scientifiques de formation différente (II.3).

Pour la recherche en revanche, les écoles d'ingénieurs sont particulièrement pauvres. Elles sont loin d'abriter autant de laboratoires que l'université. À Paris, en 1952, le financement CNRS des « établissements de l'enseignement supérieur » ne représente que dix pour cent de la somme pour l'Ile-de-France, le reste allant à la Sorbonne (85%) et aux « établissements privés (5%) [RA CNRS, 1953, p. 45]. Jusque vers 1950, seules quelques écoles d'ingénieurs accueillent des laboratoires et toujours en nombre limité.¹⁷

1.2.3. Essor du CNRS : marges de manœuvre et modes d'intervention

Depuis sa création, le CNRS dispose d'une direction duale : un pouvoir exécutif nommé, la « direction générale » (DG), c'est-à-dire un « directeur général » et une petite équipe administrative ; et un parlement, élu aux deux tiers, le « Comité national » (CN) dont le « directoire », plus restreint, assure l'action. Les fondateurs ont choisi une organisation générale basée sur une séparation des savoirs en disciplines. Le CN forme un parlement où toutes les disciplines sont représentées (31 sections en 1945) afin d'assurer une direction multidisciplinaire du CNRS [Lanciano-Morandat, 1999]. Censé être indépendant de l'appareil universitaire, le CNRS y est pourtant complètement imbriqué – assujetti même – tant par la composition de son parlement,¹⁸ que pour son organisation institutionnelle.¹⁹ « L'espace

¹⁶ Sur l'ensemble de la période 1950-2000, le système d'enseignement des grandes écoles est relativement stable comparé à la croissance exponentielle des universités [Renaut, 1995]. En 1939 et aujourd'hui, l'effectif d'écoles comme l'ESPCI ou l'ENSCP ne fait que doubler alors que celui des universités est multiplié par plus de vingt-cinq.

¹⁷ Pour prendre quelques exemples rencontrés en chimie : en 1928, on trouve un « Laboratoire de métallurgie » dirigé par Cheneau à l'École des Mines de Paris. À l'Institut de chimie de Lille (ICL), un « Laboratoire de chimie minérale » est successivement dirigé par Pascal (avant 1930), Chaudron (1930-39) puis Michel (1945-59) [Cornet, 1989, p. 4, 11]. Urbain, directeur de l'Institut de chimie de Paris, y fonde le « Laboratoire des terres rares » en 1930 [Trombe, 1968, p. 1] mais il faut attendre les années 1950 pour que Chaudron encourage le développement de plusieurs laboratoires de recherche au sein de l'École.

¹⁸ Par exemple, une étude sommaire de la répartition des vingt-quatre membres du Comité national de la section « Chimie physique – Chimie minérale » (1947-48) dénombre douze professeurs d'université (dont sept de la Sorbonne), trois professeurs autres (deux sont à Paris, le troisième en région parisienne), deux maîtres de conférences de la Sorbonne contre deux « maîtres de recherche » du CNRS et cinq personnes de diverses origines : le directeur du « Laboratoire central des services chimiques de l'Etat » et celui du « Laboratoire municipal de Paris », un « directeur général de l'enseignement supérieur », un membre de l'ONERA et un membre du CEA. Ces quelques chiffres peuvent indiquer : 1) la non représentation des femmes, 2) un poids

éducatif prévaut alors sur l'espace de recherche » [Lanciano-Morandat, 1999, p36]. Par la suite, il ne faudra pas oublier que la fée universitaire s'est penchée sur le berceau du bébé CNRS, qu'à aucun moment par la suite, le CNRS ne s'émancipe véritablement de l'*alma mater*. Près de quarante plus tard, durant les années quatre-vingt puis quatre-vingt-dix, les commissions CNRS sont toujours dominées par les professeurs d'université.²⁰ Une des conséquences de cette interdépendance est la place privilégiée occupée par Paris par rapport à la province. Les chercheurs CNRS sont d'autant mieux payés à Paris que leur grade est élevé comme le montre le tableau ci-dessous, pour l'année 1947²¹ :

Traitements de base CNRS (exprimés en milliers de francs par mois)				
Qualité CNRS	Echelon	Paris	Province	Différence relative (%)
Stagiaires de Recherches	Non agrégé	54	49.5	4.3
	Agrégé	67.5	58.5	7.1
Attachés de Recherches	Non agrégé	72	66	4.3
	Agrégé	90	78	7.1
Chargés de Recherches	1	126	120	2.4
	2	147	126	7.7
	3	168	134	11.3
Maîtres de Recherches	1	180	144	11.1
	2	195	156	11.1
	3	210	168	11.1
Directeurs de Recherches	1	pas d'échelon	165	15.4
	2	225	186	15.6
	3	255	210	20

Autre marque de la prédominance parisienne : le budget alloué à la Sorbonne par rapport à celui du reste de la France : 70% des crédits nationaux distribués par le CNRS (I.2.1).

écrasant des universitaires, 3) une sur-représentation de Paris par rapport à la province (la Sorbonne a donc bel et bien une emprise énorme sur le CNRS), 4) une ridicule représentation des membres du CNRS au sein d'une assemblée sensée gérer cette section du CNRS.

¹⁹ Le mimétisme envers l'université est présent à différents niveaux. Les « découpages universitaires » en disciplines et sous-disciplines héritées de l'entre-deux-guerres sont si prégnants qu'ils sont textuellement repris pour l'organisation du CNRS en « disciplines » et « sections » sur la période (1946-1967) [Lanciano, 1999, p11]. D'autre part, les différents échelons du personnel CNRS sont calqués sur ceux de l'université.

²⁰ « Ce qui m'a toujours choqué quand j'étais au Comité national, c'est le fait que le pouvoir est toujours dans les mains des universitaires, le poids des directeurs de recherches est tout à fait minoritaire dans les commissions. » [I Tournoux, 2006, p. 13].

²¹ Un millier de francs 1947 correspond environ à cinquante euros 2006. Les salaires sont donc plutôt confortables si on les compare à leur valeur relative aujourd'hui. Les données chiffrées sont extraites de [CNRS, 1947, p. 6-7]. Cette comparaison présente plusieurs limites : l'argent n'est pas le seul critère pour évaluer l'intérêt que représente une position, les chiffres donnés prennent en compte les « traitements de base » mais ni les indemnités supplémentaires (il semble néanmoins que les indemnités supplémentaires vont dans le même sens, ainsi « l'indemnité de cherté de la vie s'élève à 25% du traitement principal »), ni le coût de la vie (même si la cherté de la vie est prise en compte par l'indemnité de même nom), la vitesse d'ascension des différents échelons n'est pas spécifiée (elle peut tout à fait être supérieure en province). Il est clair qu'à échelon égal, le salaire des postes parisiens est plus important qu'en province. La différence relative $[(\text{Paris-Province})/(\text{Paris}+\text{Province})]$ est toujours positive. De plus, elle augmente lorsque les grades augmentent : inférieure à 10% pour les stagiaires et les chargés de recherche (échelons 1 et 2), supérieure à 10% pour les échelons supérieurs. La différence dépasse 15% pour les DR 1 et 2 pour atteindre 20% pour les DR3.

Néanmoins, malgré l'omniprésence des mandarins de l'Université dans ses commissions,²² le CNRS est un organisme qui existe par lui-même. En 1953, son budget total est de 8,6 milliards de francs (soit 168 millions d'euros 2006) [Picard, 1990, p. 214]. Les crédits distribués aux universités ne représente que 2 milliards de francs, soit un petit quart du budget global [RA CNRS, 1953, p. 45]. Le reste est affecté à la gestion (fonctionnement et matériel) des laboratoires directement rattachés au CNRS et aux salaires des employés. Sur le budget global, la part des salaires correspond à un tiers, le fonctionnement à 8% et l'équipement des laboratoires à 59%. En 1950, le CNRS emploie 1650 chercheurs (soit moitié moins que les enseignants des universités), 735 « collaborateurs techniques » et autant de « contractuels » [RA CNRS, 1951, p. 9]. Au niveau de ses objectifs, il vise à coordonner les recherches scientifiques mais opère plus par incitations que par autoritarisme central. Ce mode d'intervention doit éliminer les redondances tout en laissant une grande marge de manœuvre aux chercheurs pour leurs thèmes de recherche.²³ Pour appliquer sa politique semi-directive, le Centre dispose, jusqu'aux années 1960, de deux principaux modes d'intervention : les laboratoires sous sa tutelle et les « aides individuelles » [Lanciano-Morandat, 1999, p. 15-20].

Depuis leur création officielle par l'ordonnance du 2 novembre 1945, les « services extérieurs » [Charpentier-Morize, 1989, p. 80] du CNRS constituent le levier majeur de sa politique permettant de favoriser les « études et recherches présentant pour l'avancement de la science ou l'économie nationale un intérêt reconnu » (ordonnance du 2 novembre 1945 citée dans [RA CNRS, 1952, p. 19]). Leur création, développement et coordination relèvent *de jure* du choix exclusif de la direction du CNRS (DG et CN) mais la plupart d'entre eux sont *de facto* dirigés par des universitaires parisiens.²⁴ Cette ingérence des mandarins universitaires au cœur du CNRS peut être vue comme un manque de cadres dans une organisation encore très jeune [Lanciano-Morandat, 1999, p. 19]. Elle souligne aussi la tactique des barons de la Sorbonne pour mettre sous tutelle l'*infante* de la recherche publique française voyant là un moyen de récupérer de nouveaux crédits. La pupille résiste pourtant aux « vieilles barbes » [Friedel, 1994, p. 197] en cherchant des lieux d'asile, loin de la vénérable institution. Ainsi, une « révolution de palais » aurait déclenché une scission forte entre la Sorbonne et un groupe de jeunes chercheurs du CNRS « hauts en couleurs », repliés en banlieue parisienne sur le campus de Meudon-Bellevue : Félix Trombe,²⁵ directeur du Laboratoire de recherches sur les terres

²² Chaudron, docteur de la Sorbonne en 1921 et titulaire de la chaire de « chimie appliquée » de la Sorbonne à partir de 1948, offre un exemple-type de la place privilégiée qu'occupent les universitaires au sein du CNRS : il dirige un prestigieux laboratoire propre du CNRS (1939-62) – le « Laboratoire central des traitements chimiques » – [Cornet, 1989] ; il reçoit des aides individuelles généreuses du CNRS : « 100.000F » (1946) pour l'achat d'un cristallomètre pour l'un de ses élèves, Jacques Bénard, et deux « collaborateurs », un « technicien » et un « ingénieur » pour l'année 1947-48 [CNRS, 1949, pp84-172] ; enfin, il préside la « Commission de Chimie minérale du Comité national de la Chimie » en 1951 [Chaudron, 1954, p. 6].

²³ Le CNRS, « tout en laissant aux chercheurs l'initiative de leurs travaux, s'efforce de coordonner ceux-ci tant par le jeu de la répartition des allocations et des subventions que par l'activité du Directoire et des Commissions d'étude. Toutefois, il est inévitable, en raison de la diversité des travaux poursuivis, que beaucoup d'entre eux échappent à cette action coordinatrice. » [CNRS, 1949b, p. 1].

²⁴ Il n'y a pas là de miracle : la direction du CNRS (DG et CN) est dominée par les universitaires, or c'est cette même direction qui « oriente » les décisions pour les laboratoires propres. Ainsi, à la mort d'Urbain (ponte de la Sorbonne) en 1938, la direction du « Laboratoire central des traitements chimiques » de Vitry-sur-Seine (un des premiers laboratoires dépendant directement du CNRS) est vacante. Deux professeurs d'université s'en disputent la succession en 1939 : Chaudron et Henry Gault (chimiste organicien). La décision en faveur de Chaudron semble se décider grâce à l'appui d'un tiers, Lebeau, lui aussi mandarin de l'université (faculté de pharmacie de Paris) [Cornet, 1989, p. 3].

²⁵ Pour la « chimie minérale », Trombe incarne le cas atypique, non universitaire, qui se construit en opposition à la Sorbonne : il a raté son baccalauréat (il ne peut alors prétendre ni étudier à la faculté, ni gravir les échelons universitaires) mais a intégré l'ICP, où il rejoint le laboratoire Urbain en 1928 pour préparer une thèse sur la métallurgie des terres rares (terminée en 1936). Entré au CNRS, il devient directeur du Laboratoire (CNRS) des terres rares à Bellevue à sa création, en 1945 [I Caro, 2005, p. 1]. En 1947-48, il est déjà « maître de recherches »

rare ; Boris Vodar, directeur du Laboratoire des hautes pressions ; Claude Bonnemay, sous-directeur du Laboratoire d'électrolyse ; Aimé Cotton [Shinn, 1993], directeur d'un laboratoire de physique et d'optique... [I Caro, 2002, p. 4]. Suivant le point de vue, le campus CNRS reflète une image duale : vu de la Sorbonne, c'est un lieu d'ostracisme décrété par les mandarins envers des personnages trop remuants ; Bellevue au contraire se pense comme une place forte inexpugnable à l'abri des empires universitaires.²⁶ Le campus se démarque sur au moins quatre autres points par rapport à l'université :

1° il n'a aucune vocation pour l'enseignement, ce qui peut l'handicaper pour recruter des étudiants [I Caro, 2002, p. 4] ;

2° il dispose d'une « direction commune », essentiellement administrative, qui assure une gestion commune des instruments – ce qui n'est pas rien ! – ;

3° il mène des recherches tournées vers « la science appliquée » [CNRS, 1947, p. 8] avec parfois même une volonté d'atteindre « le stade des réalisations industrielles » [CNRS, 1948, p. 16]. Ce faisant, il assure un des objectifs du CNRS : « la [nécessaire] coordination tant administrative que technique entre la recherche pure et la recherche appliquée » [CNRS, 1947, p. 4] et se définit comme un « Centre de recherches appliquées » [RA CNRS, 1945, p. 17] et enfin ;

4° les laboratoires qui le composent abritent de « grands instruments » : cyclotron, électro-aimants, hautes pressions, hautes tensions, hautes et basses températures... [Pestre, 1984, p. 256]. Même les directeurs ont « les mains dans le cambouis ». Ces appareils technologiques sont « encombrants, demandant de l'espace », ce qui constitue une raison pratique pour les installer en banlieue parisienne plutôt qu'à la Sorbonne [I Caro, 2002, p. 4].

Deuxième moyen d'action du CNRS, les aides individuelles offrent des possibilités ponctuelles « d'intervention directe [...] sur le milieu universitaire. » Il s'agit d'un financement attribué personnellement à « un individu, personnalité scientifique reconnue » dans un rapport de « confiance » [Lanciano-Morandat, 1999, p. 20-21]. Ce type d'attribution est conforme au système mandarin de l'époque qui accorde une prédominance à certains individus par rapport au travail du groupe auquel ils appartiennent. Comme les mandarins sont très influents au Comité national, ils disposent d'un nouveau de servir leur famille scientifique. Aucun contre-pouvoir efficace ne s'exerce pour infléchir leur influence démesurée. Si les aides individuelles ont pour but d'influer sur la recherche universitaire, c'est au contraire la communauté universitaire – en particulier celle de la Sorbonne – qui utilise le CNRS pour obtenir des crédits supplémentaires.²⁷ À la fin des années quarante, au moins cinq

« première classe » au CNRS, ce qui constitue, à l'époque, le plus haut grade de la section « chimie minérale et chimie physique » [CNRS, 1949a]. Il est tellement à la marge de l'*establishment* académique français que l'Académie des sciences ne dispose d'aucun dossier sur lui malgré une reconnaissance scientifique internationale.

²⁶ Cette opposition est sans doute exagérée. Dans [CNRS, 1949a, p. 11-12], j'ai repéré sept directeurs de laboratoire à Bellevue qui sont aussi membres du Comité national pour l'année 1947-1948 : « physique corpusculaire et électronique – Electricité, Magnétisme, Electrotechnique » (4), « Mécanique physique – Thermodynamique » (2), « Chimie physique – Chimie minérale » (1). Seuls deux des sept directeurs sont à ce moment-là professeurs à la Sorbonne (ce qui n'empêche pas qu'il l'ait été). La faible proportion d'universitaires est un indice supplémentaire renforçant la thèse de la scission entre le campus de Bellevue et l'université parisienne.

²⁷ Pour la section de « chimie minérale et physique », vingt-cinq postes techniques sont distribués pour l'année 1947-48. Vingt-et-un sont situés à Paris et, parmi eux, quatorze sont affectés à la Sorbonne dans seulement six laboratoires, dont les directeurs (Audubert, Bauer, Chaudron, Chrétien, Job, Laffitte) sont tous membres du Comité national [CNRS, 1949a].

aides individuelles différentes coexistent : des mises à disposition de « collaborateurs », ²⁸ des « rémunérations de travaux effectués à la vacation », des « subventions pour frais matériels de recherches », « subventions pour frais de mission », des frais de publications [CNRS, 1949a ; RA CNRS, 1951, p. 9]. ²⁹

Il existe un troisième mode d'intervention dont dispose le Centre : les « commissions d'études », créées juste après-guerre sous l'impulsion de Frédéric Joliot-Curie.³⁰ La commission se situe dans une position intermédiaire entre l'aide individuelle et la section disciplinaire. Plus souple que cette dernière, elle se focalise sur un thème particulier de recherche, un « objet commun ». Leur but est d'associer des scientifiques de sections différentes autour d'un.. Elle se veut réactive, opportune – développer un domaine émergent – et trans-disciplinaire – la commission ne correspond ni au découpage institutionnel du CNRS, ni à celui des unités universitaires –. Elle se veut plus ouverte aussi puisque ses membres mènent aussi bien des recherches fondamentales que des recherches appliquées, travaillent à l'Université ou en industrie. Contrairement aux laboratoires, elles est délocalisée. À l'automne 1945, le CNRS compte une trentaine de commissions qui, pour la plupart, viennent d'être créées [RA CNRS, 1945, p. 13].³¹ Parmi elles, on en recense quelques-unes peu ou prou liées aux solides : chimie des hautes températures (II.3), chimie des réfractaires*, engins auto-propulsés (H. Moureu), états de Surface (Portevin), four solaire (Général Bergeron), argiles, graphite.

Pour les années 1945-1950, la recherche publique française offre l'image d'un paysage en chantier, sans plan d'ensemble, peuplé d'organismes actifs mais épars, aux relations lâches, parfois concurrentielles. On peut distinguer trois niveaux d'organisation, qui possèdent des logiques et des tailles propres : 1°) localement, dans chaque laboratoire des facultés de sciences, le directeur initie des thèmes de recherche que ses collaborateurs développent au sein du groupe qui s'insère un réseau socio-technique ; 2°) à un niveau intermédiaire, les organismes d'État coordonnent des recherches en vue d'applications dans son domaine d'expertise ; 3°) à une échelle nationale (mais non globale), le CNRS mène une recherche stratégique à travers des aides individuelles, des laboratoires propres et diverses commissions.

²⁸ Les « techniciens » (« aide technique », « agent de maîtrise », « agent technique », « ingénieur ») sont directement affectés à un professeur et non pas à un laboratoire. Cette disposition administrative pose dès à présent la question du statut moral du personnel technique dans l'organisation de la recherche.

²⁹ Pour prendre trois exemples différents : Paul Job, professeur de la Sorbonne et au Comité national (mandarin confirmé), obtient trois « aides techniques » en 1947-48 ; « 119.000F » pour l'« installation et fonctionnement du labo. rayons X » en 1945, « 362.000F » en 1946, « 272.000F » pour du matériel de labo et un « générateur ultra sons » en 1947.

Trombe (mandarin débutant du CNRS), « maître de recherches » et membre du Comité national, reçoit deux « aides techniques » (1947-48) ; « 25.000F » (1944) et « 40.000F » pour des « recherches chimie minérale » plus « 120.000F » pour le fonctionnement du Laboratoire des terres rares (LTR), plus « 50.000F » pour l'« achat potentiomètre » (1945) ; « 40.000F » pour la « rédaction d'un livre sur les HT », plus « 50.000 » pour les « frais fonct. labo. », plus « 50.000 » pour l'« achat pompe à vide et mat. en quartz. », plus « 100.000 » pour l'« aménagement d'un labo solaire », plus « 83.000F » pour l'« achat matériel en vue d'expédition spéléologique. » (1946) ; « 100.000 : compl. à subv. de 100.000 déjà acc. pour l'aménag. d'un labo solaire à l'Obs. Meudon. » et 150.000 pour le fonctionnement du LTR (1947).

René Pâris, « maître de conférences » à la faculté des sciences de Lyon, non membre du Comité national (nouvel arrivant), reçoit « 12.000F » (1944) pour « recherches de chimie minérale » ; « 200.000F » pour l'« achat d'une thermobalance Chevenard » (1947).

³⁰ Comme ce mode est le seul des trois à ne pas être mentionné par Lanciano [1999], on peut penser que son importance est moindre après les années 1960 (période qui l'intéresse le plus).

³¹ « Outre les sections précédentes du Comité Directeur qui ont étudié les problèmes propres à leur discipline, plus de trente commissions d'études existent actuellement au CNRS en majorité créées au cours de cette dernière année » [RA CNRS, 1945, p. 13].

Dix, cent, mille constituent trois ordres de grandeur qui correspondent terme à terme à chacun des niveaux.³² Si le CNRS tente de construire une coordination entre recherches « pure » et « appliquée », les laboratoires des facultés mènent des recherches universitaires ponctuelles (non liées entre elles) tandis que chaque organisme à vocation appliquée est tournée vers une recherche spécifique. Cette organisation à plusieurs niveaux, à multiples objectifs, est probablement redondante puisque chaque entité dépend d'administrations différentes. Pour certains observateurs états-uniens [OECE, 1951], elle est même globalement inefficace pour établir des liens forts entre la « science pure » et les « applications ».³³ La recherche publique française est un organisme sans tête où les multiples organes n'en font qu'à leur tête. La liberté d'action laissées aux laboratoires et à leurs directeurs caractérise la recherche universitaire des années 1945-1950.³⁴

Malgré l'absence de coordination globale les contacts spontanés entre les diverses entités se multiplient. L'appareil universitaire y joue un rôle prédominant, car l'influence des mandarins au sein des universités s'étend aux comités nationaux du CNRS pour chaque section. Paris constitue le nœud névralgique du réseau universitaire français. La Sorbonne en constitue le fer de lance : modèle scientifique, signe de prestige et organe de pouvoir. À cette époque, la région parisienne avec ses multiples écoles d'ingénieurs, la Sorbonne et le campus de Bellevue, abrite pour les sciences au moins deux tiers de la recherche universitaire nationale (80% si l'on suit l'affectation des financements CNRS aux universités). La reconstruction de la recherche après-guerre en France débute sous le signe du centralisme parisien et universitaire.

I.3. L'état solide dans les sciences expérimentales (hors chimie).

Au sein de l'éventail de disciplines académiques en réorganisation, je m'intéresse en particulier aux sciences expérimentales étudiant les solides. Si l'on veut saisir dans sa complexité l'émergence de la chimie du solide à partir des années cinquante (chapitre III), il faut s'arrêter un instant sur une double interrogation : « chimie » et « solide ». Quelle distribution sociale et cognitive emprunte la chimie française d'après-guerre ? Telle est la question à laquelle je m'efforcerai de répondre au chapitre suivant (II.1). L'autre facette

³² Ces trois niveaux d'échelle mettent en jeu des effectifs dont les ordres de grandeur sont respectivement : 10^1 , 10^2 et 10^3 personnes après-guerre. Pour un laboratoire, quelques individus à une vingtaine constitue une fourchette acceptable. Pour les organes ministériels, l'IRSID par exemple comptent 362 « salariés » en 1952, dont « 92 cadres dirigeants, 121 techniciens, 149 employés et ouvriers » [MIN, 1952-53, pp27-36]. Le CEA, par sa taille, ses moyens et ses objectifs constitue un cas à part, rapidement plus riche que le CNRS. Pour le CNRS, les effectifs passent de 2636 en 1946 (130 « agents de services centraux », 1131 « techniciens », 1375 « chercheurs ») à 3613 en 1950 (respectivement : 143, 1520, 1950) [RA CNRS, 1953].

³³ [OECE, 1951] donne les résultats d'une enquête (audit externe) conduite par des consultants américains du *Southwest Research Institute* de San Antonio sous l'égide de l'Organisation Européenne de Coopération Économique, en 1951. Même si cette enquête propose une critique prenant comme modèle (indépassable) les États-Unis, il est intéressant de noter comment deux questions préliminaires : « a) Comment se fait-il que les découvertes faites par les Français, dans le domaine de la science pure, soient souvent exploitées d'abord par les industriels étrangers ? b) Pourquoi les savants français considèrent-ils comme socialement dégradant de retirer de leur travail un profit pécuniaire ? » [OECE, 1951, p. 1] conduisent à deux « avertissements » en conclusion : 1) les liens entre la « science pure » et l'industrie sont inopérants en France, 2) les universitaires « considèrent [...] comme socialement dégradant de retirer de leur travail un profit pécuniaire ».

³⁴ « Ces directeurs de laboratoire [...] un pouvoir considérable dans leurs unités, au niveau scientifique (choix des thématiques, des programmes de recherche...) comme au niveau des moyens (bourses, recrutement, carrières, répartition des moyens...) » [Lanciano-Morandat, 1999, p. 20].

concerne la signification du solide autour de 1950. Donner une définition de l'objet cognitif conduit à tracer un état des lieux des groupes sociaux qui l'étudie (I.3). Le solide de la fin des années ne se laisse pas facilement mettre à plat. Objet multiforme, il pose une ribambelle de questions : qui, quoi, pourquoi, comment, où, quand. Il va donc falloir replier la réalité complexe d'une matière insaisissable dans les cases diaphanes des catégories conceptuelles mots : solide ou solides ? état ou élément ? physique ou chimie ? théorique ou expérimental ? fondamental ou appliqué ? Seul un lecteur naïf pourrait penser qu'à une fragmentation fractale des groupes scientifiques va correspondre l'image transparente d'un objet univoque. Comment s'agencent pour le solide les impératifs sociaux vis-à-vis des considérations épistémologiques ? Le solide comme sujet d'étude cohérent relève-t-il d'une abstraction simplificatrice ? Relier des méthodes à des groupes, des techniques à des représentations, des questions à des buts, tels sont les voies choisies pour contourner la trop simple séparation entre entités sociales et entités cognitives. Les deux sont irrémédiablement liées l'une à l'autre. Considérer un tissu sociocognitif continu et réserver le cas des chimistes pour plus tard (chapitre II) semble procéder d'une démarche contradictoire. Cette démarche a une cause et une conséquence : celle-là répond à un nécessaire choix d'organisation du récit, celle-ci tend à présenter la chimie dans une version émancipée, inversant une grille de lecture traditionnelle qui assujettit souvent la faible chimie à la toute puissante physique. Pour tracer cet état des lieux, je suivrai les catégories acceptées par les acteurs eux-mêmes, qui transparaissent dans leur langage : notices scientifiques, avant-propos des ouvrages publiés, articles de revue, discours de gala... et dans leurs institutions : annuaires, almanachs... ainsi que divers travaux en histoire de la physique.

1.3.1. Quelques porte-parole communautaires de l'état solide

Autour de 1950, le solide est reconnu comme l'un des trois états physiques de la matière par les ouvrages de vulgarisation. Par opposition au gaz et au liquide, il constitue l'état ordonné par excellence à courte et grande distance. Ses « éléments constitutifs » occupent, de manière périodique et « harmonieuse », des positions moyennes autour desquelles ils oscillent (agitation thermique).³⁵ Quand il est vulgarisé, le solide est présenté comme l'état physique idéal parce que parfaitement ordonné. Au niveau de l'enseignement, il ne correspond à aucune des disciplines universitaires qui s'enseigne à l'époque. Il est aussi introuvable dans le nom des sections du CNRS ou dans celui des laboratoires.³⁶ À première vue, le concept de « solide » ne correspond ni aux disciplines enseignées, ni aux catégories de

³⁵ Pour exemple, Philippe Olmer [1949], professeur de physique parisien, écrit un essai de vulgarisation de *La structure des choses*. Le premier chapitre divise les « choses » suivant leur structure en distinguant les trois états de la matière : gaz, liquide, solide. Dans l'état cristallin, « les éléments constitutifs de la matière s'arrangent d'une manière bien régulière dans l'espace. Chacun d'eux possède une position moyenne autour de laquelle il n'effectue que de faibles oscillations » [p. 12]. « La Nature, dont on disait autrefois qu'elle avait horreur du vide, a bien plutôt, en bonne ménagère qu'elle est, horreur du désordre. L'état cristallisé représente le plus bel achèvement d'un agencement harmonieusement disposé qu'elle tend spontanément à réaliser chaque fois que les circonstances extérieures ne s'y opposent pas. » [p. 18]. Au passage, on pourra noter l'image employée « en bonne ménagère » qui, tout en montrant le sexisme ambiant de l'époque, suggère que les scientifiques comme les autres êtres humains « raisonnent » à partir d'analogies sociales [Knorr-Cetina, 1991].

³⁶ Une classification à trois niveaux, proposée par le CNRS, détaille « les recherches poursuivies par les allocataires du CNRS et les membres de l'Université » pour l'année 1949. « Les enseignements sont classés par discipline [physique, chimie, sciences biologiques, ...] puis par spécialité [catégorie un peu différente de la « section » du CNRS, plus fine : par exemple les sections de « chimie physique » et « chimie minérale » se recomposent en « chimie générale et chimie physique », « chimie minérale et métallurgie »] et dans le cadre de chaque spécialité, par affinités [pour la métallurgie : « sidérurgie » et « métaux non ferreux »]. Dans aucune catégorie, même au niveau le plus fin, celui des affinités, n'apparaît pas le mot « solide » [CNRS, 1949b, p. 1-8].

recherche. Comment alors saisir la signification de cet objet abstrait, transverse et fugace au sein de l'Université française ?

La réponse que je propose se veut sociologique, pragmatique et simplificatrice. Sociologique parce que je n'étudie pas l'objet éthéré des philosophes qui serait le solide idéal mais que je l'ancre dans un contexte culturel et social défini. Pragmatique parce que pour réduire le nombre de conceptions du solide à quelques-unes, je me concentre sur des « communautés scientifiques pertinentes » [Lemaine & al. 1969], homogènes en leur sein mais hétérogènes vis-à-vis de leurs voisines : physique, cristallographie et minéralogie, métallurgie, céramique, verres. En d'autres termes, je replace le concept de solide dans les diverses « matrices disciplinaires » [Kuhn, 1983] qui se construisent autour de lui. C'est donc par la relation que de multiples groupes scientifiques entretiennent avec le solide qui permet de le définir dans sa variété. Simplificatrice enfin parce que je n'étudie pas les communautés dans leur ensemble mais que je me focalise sur quelques laboratoires considérés comme « porte-parole » de leur communauté.³⁷ Ainsi, le tableau ci-dessous distingue cinq catégories liées à l'étude des solides.³⁸

« porte-parole » / catégories ³⁹	Laboratoires (nom du directeur)	Objet d'étude (épistémologique)	Questionnement (méthodologique)	Type de réponses (instrumentaux)
a) physique	1) « magnétisme » : Strasbourg (Pierre Weiss) Grenoble (Louis Néel), Bellevue (Guillaud)	MO (ferrites*)	Propriétés magnétiques (phénoménologiques)	RX (diffraction, diffusion, mesures magnétiques)
	2) « électronique » : ENS (Yves Rocard) CSF (Maurice Ponte) CNET (René Sueur)	Germanium, alliages métalliques	Propriétés électroniques (semi-conduction) Transition ordre-désordre	cristallogénèse, contrôle des impuretés. Diffractions X, électronique. Microscopie électronique*

³⁷ L'idée des « porte-parole », humains et non humains, est empruntée à la théorie de l'acteur-réseau de Callon et Latour. Il s'agit ici de sélectionner quelques laboratoires visibles (par les études qu'ils ont suscitées) et d'en faire des porte-parole de communautés à travers divers critères : nom, objet d'étude, questionnement, instruments. Quoique séduisante, cette simplification est abusive puisque la structure communautaire semble d'autant plus homogène que les porte-parole sont moins nombreux. Ainsi, comme en microscopie optique, un grossissement supplémentaire permettrait de relativiser la position du porte-parole en montrant que diverses paroles coexistent au sein de la communauté. Trois garde-fous justifient en partie cette tentative : 1) je ne cherche qu'un état des lieux sommaire : trouver quelques traits caractéristiques pour comparer les communautés entre elles, j'affinerai le cas de la chimie ; 2) les communautés considérées sont des disciplines structurées et reconnues ; 3) dans la mesure du possible, je choisis divers porte-parole pour une même communauté et des sources différentes.

³⁸ J'admets les limites de cette classification. Cette structuration en « domaines » est loin d'être aussi rigide que ne le suggère le tableau : recouvrements et liens entre domaines sont nombreux, entre physique du métal, métallurgie et cristallographie, entre verre et céramique,... Les laboratoires peuvent appartenir à plusieurs communautés : par exemple, on trouve à la CSF, un « groupe de laboratoires qui s'astreignent alors [début des années 1950] à maîtriser, au sein de la firme, une série de techniques et de produits de base (métallurgie, céramiques, verrerie, physique électronique), décisifs pour la réalisation des dispositifs électriques ou électroniques. » {Pestre, 2004, p328} ; les exemples pour la « céramique » et le « verre » sont peu nombreux...

³⁹ Pour la physique, les informations proviennent de [Pestre, 1990 ; 2004] et [Atten, 1996], en particulier [Bernard, 1996] et [Licoppe, 1996] ; pour la cristallographie, je me réfère à [Ewald, 1962], en particulier au chapitre 19 « *The new Crystallography in France* » [Wyart, 1996] et aux « *Personal reminiscences* » ; pour la métallurgie, [I Friedel, 2001], [Bastien, 1954], [CNRS, 1949b, p. 71-72] ; pour la céramique [I Colombar, 2003] ; pour les verres au [Bulletin de l'Institut du Verre, 1946-1947].

b) cristallographie et minéralogie	1) Sorbonne : Charles Mauguin puis Jean Wyart	Quartz, calcite, graphite, micas, silicates	Structures	RX : diffraction, diffusion aux petits angles, ...
	2) CNAM : André Guinier (élève de Mauguin)	Métaux binaires type Al-Cu	Défauts de Guinier- Preston (1937) Dislocations (1948)	Diffusion des RX aux petits angles. Modifications méthode Laue.
	3) Bellevue : Jean- Jacques Trillat	Solides organiques et inorganiques	Structures	RX, microscopie électronique [1935-]
c) métallurgie	1) École des Mines de Paris : Charles Crussard puis Paul Lacombe (élève Chaudron)	Al	Impuretés : énergie des joints de grain, diffusion Dislocations	Instruments de Chevenard : thermobalance
	2) École Centrale de Paris : Paul Bastien (liens CEA + Schneider)	Sidérurgie : aciers inoxydables Alliages à base de Mg.	Interaction avec les gaz. Déformations plastiques. Contrôle physico- chimiques	RX, méthodes par ultra-sons
	3) LCTC (CNRS Vitry) : Chaudron (liens CEA, ministère de l'Air)	Fe, Al, Ca, Mg	Cristallogenèse*, purification. Surfaces (avec les gaz), propriétés physiques.	RX, microscopie métallographique*, thermo-magnétisme, thermobalance
	4) Mécanique expérimentale : Jacquesson R. (École mécanique et aéronautique, Poitiers)	Al (« cristaux uniques » et solution solide*)	Études mécaniques (laminage, amortissement, efforts, fatigue ...)	RX, diffusion des rayons X, métallographie
d) céramique	ENSCI (Sèvres) : C.A. Jouenne	Argiles	Composition, porosité (microstructure)	Empirique : « goûter les argiles », sentir les fonctions organiques
e) verres	<i>Bulletin de l'Institut du Verre</i> [1946] (SA regroupant tous les fabricants) : Bernard Long	De type SiO. Colorants TiO ₂ , PbO.	Synthèse : fusion, recuit... Étude surfaces. Propriétés thermiques, optiques, mécaniques. Impuretés.	

Entre un état solide idéal et unifié, et une multiplicité de solides dans des espaces sociaux distincts, l'approche sociologique proposé penche plutôt vers un pluriel, socialement localisé. En sciences expérimentales, le solide n'est pas un territoire unifié en France, autour de 1950. Il semble donc plus approprié de parler de « solides » au pluriel. Cette classification universitaire en domaines associés à des porte-parole ne répond pas encore à la question de la signification de l'objet d'étude : le « solide ». La classification sociologique doit être croisée avec une réponse synthétique, détaillée au cas par cas des cinq domaines envisagés. Je me concentrerai sur la nature des solides étudiés et sur la méthodologie employée. La synthèse ne se veut pas exhaustive mais cherche à mettre en évidence des traits caractéristiques de chaque communauté sans se soucier de tous les contre-exemples possibles.

1.3.2. Antinomie du solide : de la continuité philosophique à la rupture sociale ?

a) Entre 1940 et 1950, la physique du « métal » devient une « physique des solides » [I Friedel, 2001, p. 1]. La transition de « physique du métal » à « physique des solides » est symptomatique : on passe d'un singulier – « du » – et un état spécifique – métallique – à un pluriel – « des » – et un mot générique (plus vaste : les isolants sont aussi acceptés). Cette évolution progressive du particulier au général s'incarne dans l'ouvrage de Frederick Seitz [1940], *Théorie moderne des solides*. Cet ouvrage devient vite très populaire parce qu'il utilise une unique théorie, « la théorie des bandes »*, pour décrire la structure électronique de solides différents et ainsi de rendre compte de propriétés multiples : électriques, magnétiques, optiques. L'auteur distingue cinq « types » de solides : « métaux », « cristaux ioniques », « cristaux de valence », « semi-conducteurs » et « cristaux moléculaires ». L'ouvrage est traduit en français en 1949 [Seitz, 1949], par Claude Dugas, l'un des plus brillants élèves de Rocard, que le maître a envoyé en postdoc chez Seitz à Pittsburgh [Pestre, 2004, p. 326]. Au début des années cinquante, c'est le seul ouvrage traitant de théorie quantique des solides disponible en français [Licoppe, 1996].

Au tournant de 1950, les physiciens posent deux principales questions aux solides qu'ils étudient : caractérisation des propriétés physiques en volume et confrontation des phénomènes observés aux théories dont ils disposent. La polarisation entre expérimental et théorique existe déjà entre-deux-guerres et peut être mise en évidence à travers deux exemples-types : une école de recherche pragmatique allemande et une école théorique britannique. De 1909 à 1940, à Göttingen, l'« école de physique des solides expérimentale », dirigée par Robert Pohl, se spécialise sur les défauts ponctuels dans des monocristaux d'halogénures alcalins. En particulier, elle cherche à établir la « relation » entre la structure et les propriétés physiques (essentiellement optiques). Négligeant les apports théoriques, en lien étroit avec l'industrie, elle mise sur la « description » plus que sur l'« interprétation » des phénomènes [Hoddeson & al., 1992, p. 242-259]. Au contraire, l'école de Bristol s'intéresse à l'interprétation théorique des phénomènes qui ont été expérimentalement observés. Nevill Mott y développe d'abord, vers 1940, une théorie quantique « sur la structure électronique des solides » (théorie des bandes d'énergie). Au début des années cinquante, Mott glisse vers le problème des « impuretés » dans les métaux, en particulier l'aluminium, tandis que son collègue Charles Franck poursuit des travaux fondamentaux dans « un domaine alors en grande expansion » : les « dislocations » [I Friedel, 2001, p. 5-6].⁴⁰

Ces deux exemples étrangers et les quelques laboratoires français mentionnés (I.3.1) présentent les solides dans leurs relations au phénomène physique. Le physicien conçoit le solide comme un support de la propriété physique et cherche à rendre compte des observations empiriques dans un schéma théorique. Aussi travaille-t-il sur quelques composés chimiquement simples et structurellement bien définis : halogénures alcalins, alliages métalliques, germanium... Ce qu'il désire avant tout c'est travailler sur un monocristal* dont la taille est suffisante pour réaliser des caractérisations propres. Il étudie donc seulement les quelques composés solides dont la cristallo-genèse est facile à obtenir. D'autre part, il se cantonne aux cristaux dont la structure est simple et la composition chimique pauvre parce que ce sont les seuls pour lesquels la modélisation est possible. Du point de vue méthodologique, la relation structure-propriétés est devenue primordiale pour les physiciens.

⁴⁰ Pour une étude historique de l'école de Bristol (1930-1954), on peut se reporter à [Keith & Hoch, 1986]. L'influence de la physique des solides américaine pénètre largement en France grâce à la traduction du livre de Seitz [Seitz, 1940]. Pour plus de détails sur la physique du solide anglo-saxonne, on se référera à [Hoddeson & al., 1992].

La structure est principalement déduite de la diffraction des rayons X tandis que les mesures relèvent du magnétisme (Weiss, Néel), de l'électronique (Aigrain, Mott, CNET, CSF), l'optique (Pohl), voire la mécanique (Franck). La théorie des bandes d'énergie est la nouvelle théorie utilisée par les physiciens. C'est sur ce triptyque : diffraction des rayons X, structure-propriétés et théorie des bandes que s'est construite la physique des solides à partir des années trente [Hoddeson, 1997]. Pourtant tous les physiciens n'ont pas recours à la théorie des bandes leur préférant une approche phénoménologique (Weiss, Néel, Pohl). D'autre part, la théorie des bandes n'apporte quasiment aucune information sur les propriétés mécaniques.⁴¹ Dans ces cas-là, le lien structure-propriétés* et le rapport à la théorie des bandes ne sont pas évidents. L'étude des solides dont la mécanique est intéressante – en particulier les alliages métalliques – va intéresser moins les physiciens que les métallurgistes. En revanche, les défauts, qu'ils soient ponctuels (impuretés, lacunes) ou étendus (dislocations), deviennent l'un des centres d'intérêt de la physique des solides.

b) En cristallographie et minéralogie, la question principale touche à la détermination des « structures » solides. Le composé solide est intéressant pour la structure qu'il abrite. La diffraction des rayons X* s'est implantée lentement dans les laboratoires de cristallographie au cours des années 1920 puis 1930⁴² mais elle finit par renouveler complètement la discipline : la cristallographie prend le pas sur la minéralogie. Après-guerre, elle est devenue la technique de base, obligatoire pour un laboratoire de cristallographie. Entre 1930 et 1950, c'est la « standardisation » des structures cristallines qui constitue le principal vecteur de la formation d'une communauté internationale de cristallographes.⁴³ Les méthodes de calcul comme la « série de Fourier à deux dimensions » (dont la « méthode de Patterson » en 1935) sont développées à partir des années 1930 mais ne seront couramment employées et perfectionnées qu'après-guerre. Très liée à la cristallographie, la « chimie structurale », ou « *structural chemistry* », connaît un bon important à la fin des années 1940 grâce à l'emploi de méthodes par « essai-erreur ». Ce sont les déterminations de structures biologiques cristallisées qui occupent durablement les cristallographes (pénicilline en 1945) [Bragg, 1962]. D'autre part, l'étude de structures s'accompagne du développement et de l'utilisation de nouveaux outils, plus sophistiqués : « diffusion des rayons X » (Wyart, Guinier) et « microscope électronique » (à partir de 1935, dans le laboratoire de Trillat). Le développement de ces nouvelles techniques de caractérisation s'accompagne parfois de mise au point d'instruments d'observation : « caméra de Guinier » pour sélectionner des

⁴¹ Dans son introduction de 1940 (encore traduite en 1949 sans changement), Seitz précise : « les propriétés plastiques ne sont qu'effleurées. La raison de cette omission est, évidemment, que la théorie utilisée dans cette matière ne se déduit pas de la théorie quantique moderne d'une manière naturelle et que, par suite, il vaut mieux la traiter séparément avec quelques autres propriétés dues à la structure des solides. » [Seitz, 1949, p. V-VI]

⁴² Cahn [2001, p. 69-70] suggère que « *it is striking how long it took for the new technique for determining atomic arrangements in crystals – crystal structures – to spread in the scientific community.* » En se basant sur quelques témoignages épars (c'est dommage que Cahn ne donne pas de données chiffrées du nombre de laboratoires équipés), l'auteur suggère une prise de conscience tardive (vers la fin des années 1920) de l'importance de la technique par les cristallographes et les métallurgistes. En France, le laboratoire de la Sorbonne, dirigé par Charles Mauguin, est le premier équipé : dès 1921, il publie des structures du quartz, de la calcite... [Wyart, 1962].

⁴³ En 1935 paraissent les premières « Tables internationales » qui cherchent à rassembler et à uniformiser les structures cristallines de tous les cristaux connus à l'époque. Elles sont réactualisées au fur et à mesure surtout après la fondation, en 1946, de l'« *International Union of Crystallography* » (UIC). L'UIC se donne trois objectifs d'édition : 1) les tables internationales, 2) les « *structure reports* », 3) la revue générale internationale de cristallographie : *Acta Crystallographica*, fondée en 1948, et l'organisation d'un *meeting* international tous les trois ans, à partir de 1948 (au moins jusqu'en 1963) [Ewald, 1962, « *The Consolidation of the New Crystallography* »].

rayonnements X bien monochromatiques [Caro, 2002, p9], « sonde de Castaing »* en 1951 pour l'analyse micrométrique par rayons X [Bud & Warner, 1998, p. 214-216].

Deux thèmes de recherche principaux émergent durant les années 1930 et 1940 : l'étude des défauts et celle des phénomènes dynamiques. Le cristal* tridimensionnel, infiniment périodique et statique, constitue toujours la référence parfaite mais ce qui intéresse désormais les cristallographes, c'est plutôt l'écart à l'idéalité : écart à la composition (défauts ponctuels), dans l'arrangement (Guinier et défauts étendus), écart à l'équilibre thermodynamique. Les phénomènes dynamiques recouvrent deux études principales : les réactions chimiques dans l'état solide et la croissance cristalline, toutes deux liées à la notion de défauts, internes ou de surface. Cette effervescence (qui dépasse le monde de la cristallographie) est rendue sensible par l'organisation de congrès internationaux sur la dynamique cristalline. La Société Faraday, qui peut alors être considérée comme la référence européenne en matière de physico-chimie, organise deux « *General discussions* » sur ce thème sur une période de onze ans (interrompue par la guerre) : « *Chemical Reactions involving Solids* » en 1938 et « *Crystal Growth* » en 1949.⁴⁴ Le solide des cristallographes s'attache donc surtout à la complexité structurale des cristaux, statique d'abord puis dynamique.

c) La métallurgie est fortement marquée par ses liens avec le tissu industriel, en recherche d'applications.⁴⁵ Ainsi, en France, contrairement à la physique et à la cristallographie, repliées en France sur les facultés des sciences et l'École normale supérieure,⁴⁶ la communauté des métallurgistes est plus délocalisée entre facultés des sciences et écoles d'ingénieurs, entre pouvoirs publics et intérêts privés. Elle ne correspond pas une section du CNRS mais oscille entre physique et chimie.⁴⁷ Depuis 1904, les métallurgistes français publient dans la *Revue de Métallurgie* et, depuis 1945, ils se réunissent à la Société française de métallurgie (SFM). Chaque année, la SFM organise les Journées métallurgiques d'automne qui regroupent les Français mais s'ouvrent aussi à l'étranger (les Britanniques par

⁴⁴ Les « *General discussions* », qui se tiennent une à deux fois par an pour traiter de « *topics of major current research interest* », réunissent plusieurs dizaines de scientifiques renommés et possèdent une stature internationale. Au cours de la *discussion* de 1938 (dont le thème est proposé par W.E. Garner, futur président de la Société (1945-47)), les notions d'imperfections de réseau et de mécaniques ondulatoires sont au cœur de la compréhension de la structure cristalline : « *new understanding of crystal structure which had led to the concepts of lattice imperfections, and the development of wave mechanics in generalizing ideas about energy levels* ». Les noms de Pohl (pour l'expérimental) et de Mott (pour la théorie) sont entre autres associés à cet effort. Pour la deuxième *discussion*, les travaux de Franck sont largement discutés, Wyart et R. Hocart (Strasbourg) y participent [Sutton & Davies, 1996, p. 121 et p290]. Les « *concluding remarks* » insistent sur l'écart entre théorie et expérience (« *The subject is still in the alchemical stage* »), les notions d'imperfections, de dynamique (par opposition à l'équilibre thermodynamique) et de phénomène de surface [Faraday discussion, 1949, p. 364-365]. Ces deux réunions, organisées à Bristol (fief de Mott, Franck et Garner), montrent que les disciplines de physique du métal, métallurgie (« *steelmaking* », « *solid carbon* ») et cristallographie sont intimement liées autour de les questions de défauts, ce qui, à nouveau, relativise les découpages en communautés distinctes. D'autre part, la communication entre cristallographes est établie au niveau occidental (présence de Britanniques, Etats-uniens, Allemands, Français,...), les questions discutées sont d'ordre fondamental et appliqué, expérimental et théorique.

⁴⁵ Cette omniprésence des applications en métallurgie se retrouve tout au long de son histoire. En particulier, [Chezeau, 2004] montre de manière convaincante comment le problème très pratique posé par la production et l'utilisation de l'acier industriel a conduit au développement de la métallurgie physique autour de 1900.

⁴⁶ Pestre [1984, p. 240] décrit le « splendide isolement » des physiciens français entre-deux-guerres et cite Trillat écrivant en 1923 : « il était très mal vu de se commettre avec les industriels. »

⁴⁷ Absente des sections du CNRS (en 1950, le seul laboratoire propre lié à l'étude des métaux, le Laboratoire central des traitements chimiques (LCTC), appartient à la section « chimie minérale »), faiblement présente dans les facultés, la recherche métallurgique universitaire est concentrée dans les écoles d'ingénieurs : École centrale des arts et des manufactures (Paris), des Mines (Paris, Saint-Étienne), École nationale supérieure de mécanique et aéronautique (Poitiers, [CNRS, 1949b, p. 72]), de chimie (Nancy), au CNAM.

exemple). Trois pôles s'y distinguent : les organismes d'État à vocation appliquée (l'IRSID pour l'acier, l'ONERA et le CEA pour les métaux à tenue mécanique et les réfractaires) ; les industries privées (Schneider, Pechiney, Ugine) et certains laboratoires en écoles d'ingénieurs. Le CNRS et l'université ne jouent qu'un rôle secondaire malgré l'importance du Laboratoire central des traitements chimiques (II.2).⁴⁸ Au sein de ce groupe délocalisé entre Université et industries publiques et privées, le cumul des mandats favorise socialement quelques individus mais leur origine est plus variée qu'à l'université (I.2.1) : ingénieurs, inventeurs, concepteurs d'instruments, professeurs... Parmi eux, certains s'inscrivent dans un « mode transversal » de production des savoirs [Joerges & Shinn, 2001]. Par son parcours professionnel, Pierre Chevenard illustre ce type de trajectoire transverse : un ingénieur-inventeur utilise la popularisation de ses innovations technologiques « génériques » à travers l'industrie et les disciplines universitaires pour naviguer au sein de multiples institutions, traverser les frontières université/industrie, métallurgie/chimie, instrumentation/cognition, France/étranger et jouir d'une renommée internationale.⁴⁹ À nouveau, le rôle des familles scientifiques est crucial dans les échanges entre milieux universitaires (écoles d'ingénieurs et CNRS) et industriels : soit parce que les mandarins ont directement un pied des deux côtés de la frontière, soit parce que des liens se sont tissés entre un patron et ses anciens élèves recrutés par l'industrie. La dynastie fondée par Léon Guillet à l'École centrale de Paris constitue probablement le cas le plus emblématique pour la métallurgie française.⁵⁰ Les laboratoires reçoivent des crédits pour travailler sur des sujets favorisés pour leur potentiel appliqué en aéronautique, constructions navales ou nucléaires. La demande industrielle oriente une partie des recherches en favorisant certains alliages, certaines propriétés, certains modes de travail. D'un côté, elle bride certains

⁴⁸ À l'automne 1949, la SFM invite à Paris l'« *Institute of Metals* » de Londres pour un meeting commun entre les communautés françaises et anglaises. Durant ce meeting, trois laboratoires français sont distingués : l'IRSID, le « Centre de recherches métallurgiques » des Mines et le LCTC [JMA, 1949, en particulier p. 872].

⁴⁹ Le « mode transversal » est à mon avis largement répandu dans les mondes gravitant autour de la métallurgie. L'exemple de Pierre Chevenard est révélateur de ces comportements transversaux et cumulatifs. Diplômé des Mines de Saint-Étienne (1910), il en devient entre-deux-guerres « professeur de métallurgie » tout en occupant un poste d'« ingénieur-conseil de la Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville ». Poursuivant son ascension dans cette même société (directeur scientifique puis « administrateur »), il rentre à l'Académie des sciences en 1946, est élu président de la SFM en 1949, membre honoraire de l'*Institute of Metals*. Tout au long de sa carrière, il invente et perfectionne des instruments dans les domaines de « la métallographie, la dilatométrie, la thermogravimétrie, et autres méthodes d'analyse physicothermique » [Lebeau, 1950, p. XII-XIII]. La « thermobalance » de Chevenard en particulier est décrite dans [Bud & Warner, 1998, p. 613-615]. Ces instruments, conçus en lien avec des problèmes industriels, sont largement utilisés après-guerre dans différents laboratoires de recherche publique : en métallurgie (au Laboratoire des Mines de Crussard par exemple [Friedel, 2001, p. 5], en chimie industrielle (René Pâris, « à la Faculté Catholique des sciences de Lyon », reçoit une dotation du CNRS de « 200.000F » en 1947 pour l'« achat d'une thermobalance Chevenard ») ou en chimie appliquée (Henri Lafuma, au CNAM, reçoit « 120.000F » pour l'« acquisition d'un dilatomètre Chèvenard ») [CNRS, 1949a, p. 194-301].

⁵⁰ Pour prendre un seul exemple d'un empire scientifique de la métallurgie avec ses mandarins. A l'École centrale de Paris, entre 1900 et 1977, trois métallurgistes se succèdent "de père en fils" à la direction du laboratoire de métallurgie et au poste de professeurs : Léon Guillet, Albert Portevin (élève de Guillet avec lequel il invente les « aciers inoxydables » entre 1900 et 1915) et Paul Bastien (élève de Portevin) (titulaire de la chaire de 1942 à 1977 !) [Castro, 1990]. Vers 1950, Léon-A. Guillet (fils biologique du premier) et Portevin sont au comité de rédaction de la *Revue de métallurgie* dans laquelle Bastien publie abondamment (deux articles et trois communications pour 1949) [*Revue de métallurgie*, 1949]. Après-guerre, Bastien (1907-1982) dirige simultanément trois laboratoires : deux à l'École centrale, « un laboratoire de rayons X et un laboratoire de physique des métaux » tout en étant directeur scientifique du laboratoire industriel de la « Société des Forges et Ateliers du Creusot [...] entièrement reconstruit et rééquipé sur des bases très modernes, de 1945 à 1948 ». Il est aussi « directeur scientifique » chez Schneider depuis 1946 et occupe un poste « d'ingénieur-conseil » au CEA depuis 1949, ce qui le conduit à travailler avec le Centre d'études nucléaires de Saclay sur les « métaux intervenant dans la construction des réacteurs nucléaires et leur comportement à chaud et sous l'effet de flux de neutrons [...] domaine des métaux et alliages non ferreux, en particulier ultra-légers à base de magnésium » [Bastien, 1954].

sujets plus fondamentaux, qui semblent moins porteurs en applications, de l'autre, peut donner un cahier des charges stimulant la créativité des chercheurs. Réciproquement, l'industrie dépend de résultats produits par les laboratoires (alliages synthétisés, courbes de résistance) et d'experts universitaires qui la conseillent sur des choix stratégiques. Des conflits entre les familles scientifiques ne manquent pas d'éclater à l'occasion de rencontres publiques (joutes orales aux Journées d'automne), de publications interposées (controverses épistémologiques, affrontements méthodologiques) ou de luttes institutionnelles larvées (ambition, inimitiés). Ce sont souvent les chefs de file qui cristallisent une opposition entre deux familles.⁵¹

Au niveau de l'objet d'étude, les métallurgistes s'intéressent principalement aux solides métalliques : purs ou alliages, polycristallins ou monocristallins. Le plus souvent, les alliages constituent des solutions solides. Au début des années 1950, c'est l'élément fer qui tient le haut du pavé en recherche que ce soit pour des questions d'analyse de minerais, de purification, d'interactions avec les gaz ou par son emploi dans les aciers.⁵² L'aluminium vient ensuite pour sa large utilisation dans des alliages à tenue mécanique.⁵³ Alliages réfractaires et légers sont aussi sources de recherche académique : le magnésium, métal léger, est pressenti pour remplacer l'aluminium dans certains alliages où le poids est déterminant.⁵⁴ Du point de vue méthodologique, l'étude d'un alliage débute par le tracé d'un « diagramme d'équilibre » (renommé « diagramme de phase »* par la suite) qui constitue la base du travail

⁵¹ Après 1945, une vive controverse oppose les deux personnages phares de la communauté : Bastien et Chaudron, à propos de l'explication d'un phénomène d'interaction gaz-métal. À travers ces deux individus (qui seuls disposent de l'aura mandarinale suffisante pour s'affronter publiquement aux Journées d'automne), ce sont deux familles scientifiques, deux « écoles » qui s'affrontent en bloc (comme le montre la dernière phrase du témoignage suivant) : « Aux Journées d'automne de la métallurgie, congrès international très couru, [Chaudron] était parmi les plus écoutés. Dans les années 50, à l'occasion de l'un de ces congrès, je me rappelle son opposition à Bastien [...] à propos de la diffusion de l'hydrogène dans le fer. C'était un problème technique au départ : au moment de la Deuxième Guerre mondiale, les coques des bateaux américains en acier avaient été coupées en deux en naviguant dans des eaux froides. C'est le passage d'une rupture ductile à une rupture fragile à basse température qui explique cela. L'hydrogène qui se trouvait dans l'acier au niveau des fissures, diffusait alors rapidement en diminuant la tension superficielle. L'hydrogène diffuse dans l'acier au moment de la soudure, l'eau vapeur dans l'air autour du chalumeau est ionisée et les protons pénètrent dans le métal à ce moment-là. En protégeant les soudures de l'air ambiant le problème avait été résolu techniquement mais le débat entre les deux professeurs portait sur la compréhension du phénomène. [...] nous craignons de n'avoir personne pour défendre notre école face à Bastien. » [I Mondange, 2004, p. 5]. Il semblerait que Bastien ait pris l'avantage au cours de cette longue controverse puisque l'un des deux principaux résultats de sa carrière concerne l'« hydrogène des aciers » [Lacombe, 1984] (comme Lacombe était l'un des enfants chéris de Chaudron, son jugement n'en a que plus de valeur).

⁵² Une enquête du ministère de l'Industrie et de l'Énergie portant sur *La recherche industrielle en France 1952-1953* [MIN, 1953, p. 27-36] mentionne les recherches suivantes menées sur le fer : 1) « analyse des minerais de fer » par les laboratoires des facultés de Nancy, Toulouse, de l'Institut catholique de Paris, du Muséum d'Histoire Naturelle ; 2) « propriétés du fer pur » par le LCTC en particulier « propriétés magnétiques et électriques [...], solubilité de l'oxygène et diffusion de l'hydrogène » ; 3) « propriétés chimiques des alliages de fer » par le « Laboratoire de Bénard à l'ENSCP » qui effectue des « recherches sur l'oxydation superficielle des métaux (fer pur, fer-chrome, fer-nickel) » ; 4) « propriétés mécaniques de l'acier » par les laboratoires de « l'École des Mines de Saint-Étienne » qui étudie le « revenu des aciers rapides » et pratique des « essais sur la coupe des aciers », de « l'École centrale de Paris » qui cherche l'« influence de l'hydrogène sur les propriétés mécaniques des aciers » et met au point « une mesure des températures de coupe ».

⁵³ Pour l'aluminium : « propriétés mécaniques des alliages de l'aluminium » par le LCTC et le laboratoire de l'École des Mines de Paris qui mène des « études sur la déformation plastique des métaux et le vieillissement des alliages à base d'aluminium » [MIN, 1953, p. 27-36].

⁵⁴ Pour les « réfractaires » par le « Laboratoire de Contrôle des Produits réfractaires de l'École de Nancy » [MIN, 1953, p. 27-36]. Les métaux légers constituent un sujet à la mode puisque Chaudron présente « une magistrale conférence sur « Les récentes recherches françaises dans le domaine des alliages légers » » [JMA, 1949, p. 872].

de métallurgiste.⁵⁵ C'est par la connaissance des diagrammes d'équilibre que le métallurgiste optimise les propriétés mécaniques ou thermiques des alliages qu'il fabrique ou qu'il trouve la meilleure composition de protection contre la corrosion.⁵⁶ En jouant sur les proportions des constituants, il peut faire varier la structure intime des alliages. L'objectif final demeure les applications industrielles. Pour ce faire, les métallurgistes se livrent à des études structurales nanoscopiques* (diffraction des rayons X) et microscopiques* (microscopie métallurgique, aussi appelé métallographie). L'importance des études microscopiques (qui ne sont pas aussi développées en physique du métal) est corrélée avec celle des applications mécaniques : le but est de trouver des liens entre les structures microscopiques et les propriétés mécaniques des alliages. Cette primauté de la mécanique distingue la métallurgie de la physique du métal au niveau des caractérisations : la métallographie reste une technique propre à la métallurgie, et des théories : la théorie des bandes a peu d'intérêt pour les propriétés mécaniques qui s'expliquent non pas à l'échelle quantique mais à l'échelle microscopique. Autre différence avec les physiciens : les métallurgistes fabriquent aussi les solides qu'ils étudient (par cette caractéristique, ils se situent entre la physique et la chimie).

Certains métallurgistes sont aussi exclusivement occupés à la conception et à l'amélioration d'instruments pour les caractérisations physico-chimiques, le chauffage ou la synthèse, comme le met en évidence l'exemple des ingénieurs-inventeurs. Par cette tendance, ils servent de trait d'union entre une sphère universitaire, avide de caractérisations physico-chimiques, et celle des ingénieurs et des industriels, formés aux réalisations technologiques. Cette conception d'instruments rappelle une habitude des physiciens et des cristallographes de mise au point instrumentale lorsque l'appareil de caractérisation n'est pas disponible (trop chers ou non commercialisés) mais suggère une dimension générique supplémentaire.

d) La céramique, comme la métallurgie, renvoie à des techniques ancestrales de chauffage et de mise en forme dont les mythologies antiques gardent la trace. D'après le seul témoignage dont je dispose sur cette communauté, les habitudes de recherche semble être encore assez « intuitives » au milieu du siècle, voire même sensuelles, et peu instrumentales.⁵⁷ Les céramiques ont souvent des compositions complexes et les échantillons sont sous forme polycristalline. Ce champ disciplinaire se rapproche à la fois de la géologie (avec une place privilégiée de l'argile) et de l'étude des verres par la composition des composés (souvent à base de silice).⁵⁸

⁵⁵ [Chezeau, 2004] détaille l'émergence du diagramme de phase comme constitutive de la « métallurgie physique » à la fin du dix-neuvième siècle parce qu'il devient indispensable dans l'industrie métallurgique. Cette pratique demeure primordiale pour les métallurgistes de 1950 comme le rappelle Chaudron, dans la préface de [Glazunov, 1951] qui s'adresse à « nos étudiants de la science du métal, nos jeunes ingénieurs » : « Les diagrammes d'équilibre constituent pour ainsi dire le fil d'Ariane qui guide le métallurgiste à l'atelier dans ses fabrications ou au laboratoire au cours de ses recherches. C'est la préface indispensable à toute connaissance métallurgique sérieuse. »

⁵⁶ Les communications françaises aux JMA de 1949 se répartissent comme suit : synthèse (1), oxydation (1), textures (4), propriétés mécaniques (4), magnétiques (3), électriques (2), divers (3) [JAM, 1949].

⁵⁷ « la formation de l'École de Céramique [ENSCI] qui était encore restée une école technique plus que scientifique jusque dans les années 1950. Je dois être un des derniers à avoir recueilli l'héritage de millénaires. On avait encore un vieux professeur C. A. Jouenne qui avait été formé avant la guerre 14 dans la tradition ancestrale. On apprenait à "manger les argiles" pour reconnaître le taux de matières humiques, les teneurs en calcium, sodium, en sable, à goûter les céramiques pour mesurer les porosités, etc. On apprenait à reconnaître les fonctions organiques au nez. La céramique, c'est l'alchimie d'autrefois. Elle se perd. » [I Colomban, 2003, p. 3].

⁵⁸ « La céramique est assez proche de la géologie, en effet, dans la mesure où elle traite de roches synthétiques et d'exploitation des carrières. » [I Colomban, 2003, p. 1]. Le rapprochement avec les verres, outre des techniques de haute température et des matières premières similaires, tient à un indice tangible : la transformation du *Bulletin de l'Institut du Verre* en une nouvelle revue en 1947 : *Verres et réfractaires*.

e) Vers 1950, les verres (composés amorphes*) sont plus étudiés par les laboratoires industriels que par les universitaires. L'Institut du Verre forme un groupement puissant réunissant la plupart des industriels verriers français. Il s'est en outre fixé comme objectif l'information large aux « hommes de science », « techniciens » et « industriels » en éditant le *Bulletin de l'Institut du Verre* à partir de 1946.⁵⁹ Ce *Bulletin* donne un aperçu de la diversité disciplinaire : physiciens, chimistes (minéralistes et électrochimistes), métallurgistes ainsi que la multiplicité de laboratoires impliqués. Saint-Gobain, Philips et le Laboratoire de l'Institut du Verre sont les trois laboratoires qui publient le plus, puis on trouve de nombreux autres industriels : Compagnie des lampes, Société française radioélectrique...⁶⁰

Si on détaille les articles publiés dans le *Bulletin*, la structure des verres n'est pas le point-clé des études (malgré quelques exceptions). Déterminer la structure atomique d'un verre pose problème. La diffraction des rayons X, qui se révèle si utile pour l'analyse des cristaux, ne convient pas pour un verre. En effet, l'interférence des rayons X avec un solide ne donne un signal exploitable que dans le cas d'un empilement ordonné de plans (atomiques). Si, comme pour le verre, la disposition des atomes n'est ordonnée qu'à courte distance, sur quelques angströms, la figure de diffraction obtenue est un spectre blanc. Une telle figure est caractéristique d'une structure amorphe. Les caractérisations des verres sont donc plutôt des mesures thermodynamiques ou mécaniques. L'analyse thermique différentielle* en particulier permet de déterminer la température de transition vitreuse* qui est caractéristique d'un verre [Bud & Warner, 1998, p. 169-171]. Pour les verriers, l'essentiel est de trouver des propriétés spécifiques (thermiques, mécaniques, électriques, optiques) en vue d'applications industrielles.⁶¹ Ainsi la nature amorphe des solides influence le type de caractérisations qui leur sont appliquées et par là-même les besoins instrumentaux et théoriques de la communauté. Malgré la difficulté d'analyse structurale des amorphes, la communauté des verriers commence elle aussi à se convaincre qu'il existe une relation entre la structure et les propriétés physiques des verres.⁶²

⁵⁹ En 1946, l'Institut du Verre (qui va devenir PROVER en 1951) subit une « heureuse transformation en SA groupant tous les fabricants » sous la direction de Bernard Long. « Parmi les tâches urgentes, la plus immédiate est de mettre la documentation la plus récente et la plus complète à la disposition de ceux qui, en France, s'intéressent au verre des points de vue les plus divers » [*Bulletin de l'Institut du Verre*, 1946].

⁶⁰ Le *Bulletin de l'Institut du Verre (Verres et réfractaires* à partir de 1947) est à mon avis représentatif de la communauté des verriers parce qu'il réunit plusieurs disciplines, des industriels et des universitaires, des Français et des étrangers. Le comité de patronage de 1947 contient trois membres de l'Académie des sciences (dont Chevenard), le directeur du CNRS, de nombreux responsables industriels. Plusieurs professeurs d'université (dont Chaudron et Trombe) participent au comité de rédaction. La revue s'est adjoint des membres correspondants à l'étranger : États-Unis, Grande-Bretagne, Belgique, Tchécoslovaquie. D'autre part, l'origine des auteurs est extrêmement variée, sur la période (1949-1951), on trouve trois centres plus actifs : Saint-Gobain, Philips, Laboratoire de l'Institut du Verre (qui publient plus d'une fois) et de nombreux autres centres : Institut de physique expérimentale (Turin), Institut T.N.O. de physique appliquée (Delft), Institut national d'optique (Arcetri-Florence), Société française radioélectrique (Section Verres et Métaux du service de développement des Lampes), Institut national du verre (Charleroi, Belgique), faculté des sciences de Nancy (François Suhner), École nationale supérieure d'électrochimie et d'électrometallurgie (dirigée par Jean Lucien Andrieux à Grenoble), Max-Planck-Institut für Silikatforschung (Ostheim v.d. Rhön) [*Verres et Réfractaires*, 1949-1951].

⁶¹ En se basant sur les articles publiés dans le *Bulletin de l'Institut du Verre* sur l'année 1946-1947, un comptage rapide des articles donne pour la première année : synthèse (3), structure (2), propriétés thermiques (2), thermodynamiques (3), mécaniques (2), électriques (1), optiques (1) [*Bulletin de l'Institut du Verre*, 1946-1947].

⁶² Ainsi, entre 1946 et 1951, deux articles (du même auteur, J.M. Stevels) issus du Laboratoire Philips à Eindhoven mentionnent un lien entre structure et propriétés : « Les propriétés optiques du verre en rapport avec sa structure » (1948) et « Relations entre les structures des verres et leurs propriétés mécaniques, physiques et chimiques » (qui est le texte d'une conférence faite au centre de perfectionnement technique, le 10 octobre 1948, dans le cadre d'un « Cycle de l'étude des structures internes ») [*Verres et Réfractaires*, 1946-1951]. Le thème n'étant traité que par un seul auteur étranger, je présume que c'est une idée qui n'est pas très implantée au sein de la communauté française des verres.

Conclusion

Comment apparaît le solide à travers les filtres superposés des communautés scientifiques (I.3), du système universitaire (I.2.) et de l'organisation de la recherche (I.1) ? Quelle est la signification que lui confère le prisme des sciences expérimentales (hors chimie) vers 1950, en France ?

Le mot qui, le premier, vient à l'esprit est rupture. Le « solide » peuple une multitude de territoires institutionnels distincts : l'Université et l'industrie, les organismes d'État et la sphère privée. Mais ses divisions tiennent aussi aux formes multiples qu'il revêt – cristallisé ou amorphe, monocristallin ou polycristallin, opaque ou transparent – et aux espoirs qu'il suscite – support d'un phénomène cognitif ou source d'applications –. Certains l'aiment pour sa structure complexe, d'autres pour ses propriétés physiques, d'autres pour la vérification théorique qu'il permet, quelques-uns comme objet à fabriquer. Une analyse sommaire distingue pas moins de cinq communautés différentes qui étudient des solides avec des regards, des croyances et des méthodes spécifiques. Physique des solides, cristallographie et minéralogie, métallurgie, verres et céramique sont autant de domaines qui envisagent le solide avec leurs propres matrices disciplinaires, plus ou moins stabilisées. Une telle perspective envisage l'espace (sociétal) des solides comme un patchwork de régions séparées par des frontières sociales et cognitives. Il peut alors paraître illusoire d'utiliser un mot unique, singulier pour désigner autant de pluriels dans les comportements. Comment un concept – l'idée (platonicienne) de solide – peut-il subsumer autant d'objets sociaux et cognitifs éparpillés ?

Si l'unité du solide est introuvable, l'état solide en revanche jette des ponts entre les communautés. Si on détecte sans doute des groupes constitués qui s'approprient des solides, on voit aussi des croyances, des méthodes, des instruments partagés entre ces groupes : tendance au réalisme, croyance en l'existence d'atomes, foi en une relation qui relierait la structure atomique à des propriétés macroscopiques, essai de quantification d'observables physiques, instruments de mesure, appareils de diffraction des rayons X. Toutes ne sont pas partagées par tous les acteurs mais chacune des communautés est ouverte aux autres, les territoires se superposent même parfois. En d'autres termes, les frontières culturelles et cognitives, marquées au sol (social) par des bornes institutionnelles, ont une structure poreuse. Nombreux sont les « acteurs » (humains, instruments, méthodes, théories) qui franchissent les frontières et parcourent plusieurs communautés. C'est en cela que l'on peut dire que deux disciplines sont voisines, parce qu'elles sont connectées. Congrès, comité de rédaction de revue, conseils scientifiques en industrie, laboratoires sont autant de lieux d'échanges et de contact.⁶³ Pour les personnes, le passage est d'autant plus facile qu'elles occupent des positions officielles de part et d'autre. Tout mandarin n'est pas un voyageur transdisciplinaire mais le mandarinat facilite le voyage transfrontalier. Le diplomate est d'autant plus convaincant que son ambassade est une place forte.

À la rupture communautaire répond donc une porosité frontalière. La dualité entre des frontières ancrées dans les institutions et des migrations incessantes rend le solide difficile à saisir. Quels sont ses principales caractéristiques ? Ce sont des objets façonnés dans la matière, qu'il s'agit d'identifier (même si cette préoccupation est moins forte pour le physicien plus intéressé par le phénomène que par la matière). Pour leur délivrer une carte

⁶³ L'interpénétration des disciplines est palpable autour de la métallurgie : aux Journées d'automne de 1949, on trouve Guinier et Trillat (cristallographes), Pierre Süe (radiochimiste du laboratoire d'Irène Curie), et Chaudron (chimiste et métallurgiste), conseiller scientifique du CEA comme Bastien (métallurgiste) tandis que Wyart (cristallographe) et Bénard (chimiste minéraliste) publient dans la *Revue de métallurgie*.

d'identité, le scientifique doit les caractériser par leur formule chimique (surtout céramiques, verres et alliages métalliques), par leurs structures nanométriques (très importante pour les cristallographes et les physiciens) et micrométriques (pour les métallurgistes à cause des propriétés mécaniques et pour les cristallographes), par leurs propriétés physiques (physiciens) et mécaniques (métallurgistes), en volume (physique et céramique) ou en surface (corrosion en métallurgie, croissance en cristallographie, optique pour les verres). La croyance en une relation (explicitable) entre la structure atomique et les propriétés physiques est largement partagée par les diverses communautés (même si elle n'est pas mentionnée pour la céramique). Elle a été à tel point constitutive de la physique des solides depuis les années trente [Hoddeson, 1997] que cette idée est présente dans les ouvrages de vulgarisation.⁶⁴ La convergence des communautés autour de cette idée centrale résulte du comportement des divers solides et d'échanges incessants entre les acteurs. Le solide parfait (ordonné, statique, infiniment périodique) qui sert de référence pour la vulgarisation scientifique n'intéresse plus vraiment les chercheurs. Après-guerre, deux nouvelles qualités du solide, liées l'une à l'autre, bousculent la primauté du solide parfait.⁶⁵ Premièrement, les défauts qu'ils soient ponctuels ou étendus voient leur statut épistémologique s'inverser. Alors qu'ils ont longtemps été perçus comme un problème par les scientifiques – comme leur nom l'atteste, les défauts ne sont-ils pas à la matière ce que l'« imperfection morale » [Le Petit Robert] est au caractère humain ? –, les défauts sont désormais valorisés parce qu'ils sont porteurs de nouvelles propriétés physiques. Deuxièmement, le solide apparaît comme un objet en évolution. De plus en plus, les chercheurs (en particulier les cristallographes) s'intéressent à la transformation structurale (réactions et croissance cristalline).⁶⁶ Parce qu'elles se situent à la conjonction du défaut et de la dynamique structurale, les transitions « ordre-désordre » sont d'actualité au début des années cinquante pour les physiciens et les cristallographes.

L'abstraction philosophique du « solide » ne se matérialise donc qu'à travers une multitude d'objets cognitifs, équivoques et instables. Tel un caméléon, le solide se transforme chaque fois que son environnement social se modifie. Ce faisant, il est défini par une circularité liant les aspects culturels, sociaux et cognitifs. Par ses migrations du cognitif au stratégique, du fondamental à l'appliqué, du public au privé, l'état solide convoque l'idée d'un tissu sociétal sans couture. Paradoxalement, par ses transformations à la traversée de frontières, par ses avatars sans nombre, le solide évoque l'image d'un tableau *discret*, c'est-à-dire parsemé de ruptures et profondément invisible.

⁶⁴ Pour la physique, cette idée est déjà vulgarisée en 1950. Ainsi, [Olmer, 1949, p. 168] souligne un lien fort entre la structure et les « propriétés macroscopiques » d'un solide : « les particularités de la structure d'un corps, son mode d'arrangement à l'échelle de l'atome, peuvent déterminer et expliquer en grande partie les propriétés physiques macroscopiques que l'on observe... il ne suffit plus au cristallographe actuel d'énoncer que si l'opium fait dormir, c'est qu'il possède une vertu dormitive, mais bien de rechercher patiemment en quoi réside justement cette propriété particulière. »

⁶⁵ Les verriers, qui sont aux prises avec des composés amorphes, ne sont pas friands du modèle du solide parfait parce qu'il ne leur apporte pas grand chose.

⁶⁶ Dans l'introduction de l'ouvrage de cristallographie [Dekeyser & Amelinckx, 1955], rédigée par Wyart, on retrouve les quatre points suivants : 1) l'évidence acquise et de moins en moins problématique du lien structure-propriétés : « Quand le cristallographe a établi la structure atomique d'un cristal [...] on en peut prévoir, parfois avec précision, la plupart des propriétés : propriétés mécaniques (élasticité, clivage, dureté), la fusion, les propriétés optiques (comme la biréfringence, ...), électriques, magnétiques. » ; 2) l'équivalence épistémologique des diverses propriétés alors que, socialement, les métallurgistes étudient plus les propriétés mécaniques, les thermodynamiciens, les propriétés thermodynamiques, les physiciens, les autres ; 3) la perméabilité des communautés : dans l'« index des auteurs » sont cités des physiciens (Seitz, Mott, Franck, W. Shockley...) et des métallurgistes (Paul Lacombe) ; 4) le lien entre les défauts étendus et la croissance cristalline au travers de la théorie de Franck (1949) : « En s'appuyant sur les « dislocations hélicoïdales », certains théoriciens, et en particulier F.C. Franck, ont donné, de la croissance des cristaux, une théorie en accord avec l'expérience. »

Chapitre II.

Les solides en chimie avant 1950 :
superposition de strates familiales,
sous-disciplinaires et trans-disciplinaires.

Chapitre II. Les solides en chimie avant 1950 : superposition de strates familiales, sous-disciplinaires et trans-disciplinaires. 55

<i>Introduction</i>	57
<i>II.1. Itinéraire de l'objet « solide » : de la chimie aux groupes en chimie minérale</i>	58
II.1.1. L'état solide, une logique sans fondement en chimie ?.....	58
II.1.1.1. À propos du solide en chimie universitaire	58
II.1.1.2. Des solides dispersés parmi les sous-disciplines.....	60
II.1.1.3. Éclectisme des laboratoires de chimie.....	62
II.1.2. À la rencontre de groupes étudiant les solides en chimie minérale.....	64
II.1.2.1. La composition élémentaire comme voie d'entrée épistémologique	64
II.1.2.2. La famille scientifique comme cellule sociale structurante.....	68
II.1.2.3. Des thèmes de recherche dans la diagonale disciplinaire.....	70
II.1.3. Vers une définition des solides pour les minéralistes français avant 1950.	71
<i>II.2. La Chaudronnerie ou la construction d'un empire scientifique en République française (1913-1976)</i>	72
II.2.1. De la croissance graduelle de l'empire (1913-1950).....	73
II.2.1.1. Un petit étudiant de la grande Sorbonne (1913-1921)	74
II.2.1.2. Les premiers pas du chercheur dans les traces du maître (1921-1928) :	76
II.2.1.3. L'époque lilloise ou l'essor du professeur de province (1928-1939).....	80
II.2.1.4. De l'Occupation à l'après-guerre, une montée en puissance du mandarin (1939-1950).....	82
II.2.2. Quelques constantes épistémologiques, sociales et culturelles en Chaudronnerie	85
II.2.2.1. Une représentation expérimentale et interdisciplinaire des solides.....	86
II.2.2.2. Du bon fonctionnement d'un laboratoire : structures internes et ouvertures frontalières.....	88
II.2.2.3. De l'unité d'une famille scientifique ?	93
II.2.3. Essaimage entre rayonnement impérial immédiat et homogénéisation des élites à venir.....	97
<i>II.3. Hautes températures et réfractaires : un thème entre science et industrie</i>	98
II.3.1. Le mécénat privé pour encourager la recherche appliquée (1921-1939)	98
II.3.1.1. Le Comité Rothschild (1921) et la rédaction des <i>Fours électriques et Chimie</i> (1924)	99
II.3.1.2. Proto-communauté et dynamisme des hautes températures	100
II.3.2. Du Comité Rothschild à la Commission CNRS : essor et structuration d'une communauté (1945-1950)	102
II.3.2.1. Rupture institutionnelle, continuités méthodologiques et humaines	102
II.3.2.2. Visages de la Commission au début des années cinquante	103
<i>II.4. Les « réactions dans l'état solide » : un réseau européen vers 1950</i>	109
II.4.1. Du foisonnement expérimental à l'impératif de classification : exemple du travail de Jacques Bénard (1933-1946)	109
II.4.2. L'organisation d'un colloque international à Paris (1948).....	113
<i>Conclusion</i>	117

Introduction

Le premier chapitre a défendu l'idée que, pour les sciences expérimentales, l'état solide ne reflétait aucune cohérence épistémologique *a priori* mais déclinait des variations sociologiques *a posteriori*. Il s'est focalisé non pas sur le concept unifié mais sur des communautés scientifiques qui se sont réapproprié les solides en les plaçant au cœur de leur matrice disciplinaire. La chimie est l'une d'entre elles, connectée aux autres évidemment, mais développant ses propres problématiques. Le deuxième chapitre cherche à relier la chimie universitaire à la représentation qu'elle peut porter de l'objet « solide » avant 1950. Partir de l'institution, passer par le travail quotidien pour atteindre l'idée de solide. Comprendre l'objet solide (idéal et matériel) des chimistes revient à cartographier leur espace (cognitif et social). Dire qui étudie quels solides, et comment, et pourquoi.

Pour ne pas me perdre sur un territoire trop vaste, j'ai procédé simplement, en croisant la discipline institutionnelle – la « chimie » – avec le mot « solide » (II.1.1). Je me suis d'abord demandé qui, parmi les chimistes, étudient les solides et je suis tombé sur une sous-discipline plus proluxe que les autres : la « chimie minérale ». Ce croisement permet de fixer en un tour d'horizon un instantané vers 1950. Il révèle la présence de structures collectives en deçà du niveau disciplinaire – la famille scientifique –, au delà de lui – le réseau trans-disciplinaire – et à sa périphérie – le groupe transversal – (II.1.2). Tour à tour, je développe pour chacune de ces catégories un exemple caractéristique. Je décris d'abord l'évolution de la « Chaudronnerie », l'un des empires familiaux les plus marquants du siècle français (II.2). Ensuite, je me penche sur la trajectoire d'un groupe thématique transversal à l'intersection de l'Université et de l'industrie : la « Commission des hautes températures et des réfractaires » (II.3). Enfin, je clos le récit sur la description d'un réseau trans-disciplinaire et trans-national d'étude des « réactions dans l'état solide » (II.4). Ces quatre groupes – familial, transversal, disciplinaire et transdisciplinaire – s'empilent par ordre croissant de taille pour former une organisation sociale complexe. C'est de cet empilement que se dégage une image fragmentée du solide pour les chimistes, qui implique des choix épistémologiques, méthodologiques et instrumentaux variés.

II.1. Itinéraire de l'objet « solide » : de la chimie aux groupes en chimie minérale

Quels sont les chimistes qui étudient les solides (II.1.1) ? Cette question naïve questionne la méthode historiographique. Comment n'oublier personne tout en gardant une lisibilité simple ? C'est à l'Université, à la conjonction de la discipline chimique et de l'état solide, que débute l'enquête historique (II.1.1.1). Assez rapidement, elle s'orientera vers la sous-discipline « chimie minérale », plus pertinente (II.1.1.2). Cette focalisation n'étant pourtant pas suffisante, il faudra encore descendre d'un étage institutionnel, à l'échelle du laboratoire (II.1.1.3).

II.1.1. L'état solide, une logique sans fondement en chimie ?

II.1.1.1. À propos du solide en chimie universitaire

L'université française est compartimentée en disciplines et sous-disciplines d'enseignement et de recherche. Dans les facultés de science, la discipline chimie est découpée en plusieurs sous-disciplines, distinctes aux niveaux des objets, des méthodes et des groupes psycho-sociaux. Le premier critère opérant est la composition élémentaire de l'objet d'étude : « minérale », « organique » ou « biologique ». Une telle répartition est censée recouvrir la totalité du spectre des composés à l'état naturel. La chimie organique, d'abord conçue comme « chimie des êtres organisés » au début du dix-neuvième siècle, désigne bientôt la « chimie du carbone et de ses dérivés » [Bensaude & Stengers, 1992, p. 166]. Elle s'attache surtout à l'étude de molécules plus ou moins complexes (échelle du nanomètre). L'adjectif minéral fait référence aux composés extraits de la mine, aux minerais, mais la chimie minérale couvre par contrepoint tout ce qui n'est ni organique, ni biologique. La chimie biologique enfin s'intéresse aux composés extraits de la matière vivante, qui correspondent à de grosses molécules (acides nucléiques, protéines, tissus musculaires...). Une vive opposition dresse traditionnellement l'une contre l'autre chimies organique et minérale tandis que la chimie biologique, plus jeune, fait plutôt figure d'*outsider* par rapport aux autres vers 1950.¹

Un deuxième critère de démarcation réside dans la méthodologie employée que ce soit par les méthodes expérimentales et les objectifs à atteindre. Ainsi, la « chimie générale », qui cherche plus à étudier des phénomènes et lois physiques que la matière elle-même, se distingue des trois autres. Ce faisant elle est plus proche de la physique. D'ailleurs, au milieu du siècle, l'appellation « chimie générale » (qui porte une dimension généraliste) est progressivement remplacée par l'expression « chimie physique ». Cette dérive sémantique

¹ L'opposition organique/minéral est constitutive de la chimie depuis le dix-neuvième siècle pour des raisons d'objet et de pédagogie [Bensaude & Stengers, 1992, p. 178-185]. Elle est rendue plus sensible dans la sémantique des chimies anglo-saxonne et germanique qui emploient des mots opposés et exclusifs : « *inorganic* » (« *anorganische* ») par opposition à « *organic* » (« *organische* »). En langue française courante, le terme « minéral » est synonyme d'« inorganique », défini comme tout ce qui n'est pas « organique » [Le Petit Robert, 2002]. Entre-deux-guerres, le Collège de France par exemple ne possède que deux chaires de chimie : l'une d'organique, l'autre de minérale. Cet agencement binaire de la chimie est remis en cause par l'émergence d'autres sous-disciplines : analytique, physique, biologique.

tout à la fois sert de caution sociale (la physique est alors la science par excellence) et indique une évolution méthodologique marquée par la « révolution instrumentale » qui bouleverse la chimie au cours du siècle [Morris, 2002].²

Vers 1950, en France, la recherche universitaire en chimie est construite suivant les quatre principales sous-disciplines et les deux critères.³ Si certains ouvrages d'enseignement adoptent un découpage plus complexe – pouvant articuler dix domaines différents⁴ –, l'état solide n'y constitue pas un critère de démarcation entre sous-disciplines. Certes les chimistes, suivant les physiciens, pensent qu'il existe trois principaux états de la matière (quatre avec les plasmas), mais la construction historique de la chimie ne s'est pas faite sur des distinctions relatives aux états de la matière. L'héritage des divisions institutionnelles en témoigne. Par conséquent, le solide n'est pas étudié par toutes les sous-disciplines et, réciproquement, aucune sous-discipline n'étudie que des solides et tous les solides.⁵ Comme pour les autres sciences expérimentales, l'état solide est socialement invisible mais culturellement continu.

Une tendance générale de la chimie internationale (mais aussi des autres sciences expérimentales) peut être mentionnée ici : l'idée selon laquelle un composé chimique est parfaitement caractérisé par un ensemble de données numériques. Cette obsession de l'identification opère selon un aller-retour : un composé nouvellement synthétisé est défini (pour la première fois) par la prise d'un ensemble de mesures chiffrées, telles les constantes thermodynamiques ; réciproquement, face à un composé dont on veut obtenir l'identité, la comparaison de mesures effectuées avec les valeurs tabulées permet de l'authentifier. D'où l'importance pour les chimistes de mesurer et de répertorier ces données : de 1909 à 1947, le Conseil international d'unions scientifiques et l'Union internationale de chimie ont publié, annuellement et en trois langues – français, allemand, anglais –, des *Tables de constantes et de données numériques de chimie, de physique, de biologie et de technologie* [TAB, 1909-1947]. Le projet, encyclopédique, s'efforce de réunir les données chiffrées de tous les composés connus. Les solides en particulier y sont répertoriés et caractérisés par des « constantes »

² Les deux termes « chimie générale » et « chimie physique » coexistent encore largement après-guerre : de nombreux laboratoires universitaires s'intitulent encore « chimie générale », la section correspondante du CNRS est nommée « chimie physique » à partir de 1946 [Lanciano-Morandat, 1999, p. 144] mais l'usage continue à présenter la sous-discipline en associant « chimie générale et chimie physique » [CNRS, 1949b, p. 8].

³ De 1946 à 1967, les quatre sections chimie du CNRS s'appellent chimies « physique », « minérale », « organique » et « biologique ». Leur définition est donnée dans [Charpentier, 1989], avec plus ou moins de succès. Néanmoins, les catégories ne sont pas aussi figées : un rapport du CNRS de 1949 divise la discipline chimie suivant les cinq « spécialités » : « chimie générale et chimie physique », « chimie minérale », « métallurgie », « chimie organique », « biochimie » [CNRS, 1949b, p. 8] en rajoutant la « métallurgie » aux sections. D'autres domaines existent après-guerre : catalyse, radiochimie... mais n'étant pas dominantes, n'existent pas en tant que sous-disciplines de la chimie française.

⁴ Dans un ouvrage tiré de ses cours à *Caltech* (université de Californie) et traduit en français (par René Pâris), Linus Pauling [1951] distingue dix « branches de la chimie » : chimie générale (introduction à l'ensemble de cette discipline) ; analyse qualitative (méthodes de détection des substances chimiques) ; analyse quantitative (méthodes de détermination exacte des quantités des diverses substances présentes dans un échantillon de matière) ; chimie inorganique (chimie des éléments autres que le carbone et de leurs combinaisons) ; chimie organique (chimie des composés du carbone) ; chimie physique (étude des relations quantitatives se rapportant aux propriétés des corps et à leurs réactions) ; biochimie (chimie des substances élaborées par les organismes vivants) ; chimie structurale (étude de la structure moléculaire en relation avec les propriétés des corps) ; radiochimie (chimie des éléments radioactifs et des réactions intéressant le noyau des atomes) ; chimie industrielle (chimie des procédés industriels).

⁵ La dualité solide/solution de la chimie biologique est sensible dans [Morris, 2002] qui montre que l'état solide est surtout envisagé pour les études de diffraction des rayons X des molécules du vivant. La chimie organique n'étudie pas l'état solide à cette époque.

analytiques, thermodynamiques, structurales...⁶ Cette idée, selon laquelle chaque composé solide (ou autre) est authentifié par un ensemble de chiffres répertoriés, constitue une croyance forte au sein de la communauté des chimistes. Elle traduit une ambition encyclopédique, dont se sont inspirées les pratiques policières, d'authentifier, d'identifier, de classer et de contrôler tous les composés chimiques fabriqués ou naturels.

II.1.1.2. Des solides dispersés parmi les sous-disciplines

Si, au niveau d'ensemble de la chimie, le critère solide n'est pas pertinent, qu'en est-il lorsque l'on descend d'un cran, au niveau de la sous-discipline ? En mars 1949, le CNRS édite un premier *Bulletin* [CNRS, 1949b] puis un deuxième [CNRS, 1949c] pour établir « une liaison à la base entre les chercheurs ». L'idée qu'a eu Haissinsky (maître de recherches à l'Institut du radium) est « la création d'un bulletin qui donnerait l'indication des recherches poursuivies par les allocataires du CNRS et les membres de l'Université » [CNRS, 1949b, p. 8]. Un tel projet poursuit un objectif pratique : assurer une meilleure communication entre les universitaires français. Ce faisant, il s'inscrit dans une perspective couvrant non seulement le CNRS mais aussi les laboratoires des facultés des sciences. Sa logique, qui s'opère non pas de l'administration au chercheur mais entre chercheurs, s'appuie sur le contenu précis des travaux individuels (voire de petits groupes autour d'un leader) pendant l'année 1947-1948. Un tel outil, à la fois pragmatique et collé aux acteurs, fournit donc à l'historien un cliché très précis de la recherche universitaire française à la fin des années quarante.

Ce document classe les travaux selon un premier niveau : les « spécialités », qui sont à peu près équivalentes aux sous-disciplines universitaires (II.1.1.1). Le deuxième niveau de classification est plus intéressant : au sein des « spécialités », on trouve des « affinités ». Le mot renvoie bien à la dimension pratique : faire interagir les chercheurs par affinités. Pour la chimie, on dénombre pas moins de vingt-neuf affinités différentes. Aucune d'entre elles ne contient le mot « solide » dans son énoncé. Trois énoncés pourtant suggèrent la présence de solides : « physico-chimie des surfaces » dans « chimie générale et chimie physique » ; « sidérurgie » et « métaux non ferreux » dans « métallurgie ». Ce deuxième niveau n'est donc pas suffisant pour cerner les solides et il faut encore descendre d'un cran, jusqu'à l'énoncé des travaux individuels. L'annexe A.II.1 fournit l'inventaire des travaux classés en chimie par le document [CNRS, 1949b-c] se rapportant à l'étude des solides. Elle les ordonne suivant les deux classifications – « spécialité » et « affinité » – puis précise le laboratoire, le chercheur le plus gradé, énonce le sujet de l'étude, éventuellement la filiation du chercheur (si je la connais). Ces travaux se répartissent comme suit en fonction des spécialités :

sous-disciplines chimiques	minérale	générale et physique	métallurgie
nombre de travaux	25	9	3

Le nombre de travaux en « chimie minérale » est deux fois plus important que ceux des deux autres sous-disciplines mises ensemble. C'est donc la sous-discipline de plus fort poids dans l'étude des solides. Cette considération quantitative corrobore les récits fondateurs et les témoignages d'acteurs, qui assignent à la chimie minérale le rôle d'ancêtre de la « chimie du solide » (III.1). Cependant, la délimitation de l'ensemble des travaux de chimie liés à l'état solide n'est pas claire. Elle ne coïncide pas avec les limites de la chimie minérale

⁶ Ces tables sont sous le contrôle d'un comité de gestion où tous les membres sont français et d'une commission internationale. Parmi les sept membres du comité de gestion, outre deux physiciens et trois chimistes, on trouve un cristallographe (Wyart) et un chimiste minéraliste (Pierre Jolibois) qui étudie les solides.

– certains *minéralistes* travaillent en solution – et n'est pas incluse en elle – des *généralistes*, des métallurgistes étudient aussi les solides –.⁷ Ceci étant dit, la convergence des données numériques et des témoignages est un indice fort. Aussi, je me contrerai, par la suite, sur la seule chimie minérale. Pour celle-ci non plus, l'état de la matière ne constitue pas un critère essentiel : les composés minéraux étudiés peuvent être des gaz, des ions et des complexes en solution liquide (aqueuse ou non), des poudres céramiques à haute température, des catalyseurs hétérogènes aux interfaces solide-liquide, solide-gaz... Les deux affinités de la spécialité chimie minérale portent des dénominations vagues : « analyse minérale » et « préparation et propriétés » [CNRS, 1949b, p. 8]. Comme pour la chimie, la sous-discipline « minérale » étudie tous les états de la matière sans favoriser les solides. Ceci confirme au passage que le découpage disciplinaire en fonction de la composition : organique, minéral ou biologique, est bien en place jusqu'à la fin des années quarante.

Comment est-il possible d'affiner la description sous-disciplinaire pour faire apparaître une classification des états de la matière ? Une image intéressante de la situation est fournie par l'ouvrage de référence pour les *minéralistes* français de l'époque : le *Traité de chimie minérale*. Cette immense œuvre en douze volumes de plusieurs centaines de pages chacun a réuni soixante-huit collaborateurs sous la direction de Paul Pascal entre 1932 et 1933. *Le Pascal*, de son petit nom, constitue encore vers 1950 la référence au niveau national même si de nouvelles recherches se sont développées durant les vingt ans écoulées. L'introduction rédigée par Pascal présente les orientations générales de l'ouvrage : sans être encyclopédique, ni destiné spécifiquement aux étudiants, *le Pascal* a pour ambition de donner une « idée complète de cette Science » [la chimie minérale] et d'être utilisable par les chercheurs de « toutes tendances » [Pascal, 1932-1933, p. 1].⁸ Son schéma fournit une idée de la façon dont les minéralistes d'entre-deux-guerres conçoivent l'organisation de la connaissance en chimie minérale. Chaque tome traite plusieurs « corps » classés suivant des « propriétés analogues », les corps étant surtout des éléments chimiques – hydrogène, oxygène – mais aussi diverses espèces – eau oxygénée, ammonium –. Le critère choisi – regroupement par les propriétés – utilise les ressources du tableau périodique : classification en colonnes et périodes, sans le suivre toujours.⁹ À nouveau, le critère n'est pas l'état de la matière, l'objet solide est parcellisé, cloisonné. On est donc plus tenté de parler de solides plutôt que du solide.¹⁰ D'autre part, l'ouvrage mêle aux résultats fondamentaux, des considérations sur

⁷ Les frontières entre les sous-disciplines sont soumises à des critères qui sont difficiles à identifier précisément. Sans doute sont-ils fluctuants : dépendent-ils du chercheur qui précise son domaine sur la notice qu'il fournit ou des rédacteurs de [CNRS, 1949b] ? Néanmoins, deux types de travaux sont clairement positionnés en « chimie générale » : l'instrumentation et la cinétique des réactions de surface. Il résulte de l'absence de règles visibles des imbroglios amusants. Ainsi, dans l'annexe A.II.1, le nom du laboratoire ne correspond pas forcément à la spécialité dans laquelle se range le travail cité (Lebeau est professeur de chimie minérale mais ses travaux sont classés en chimie générale) ; des chercheurs d'un même laboratoire peuvent être mis dans deux spécialités différentes (Amiel et Nortz) ; les travaux d'un même chercheur peuvent appartenir à deux spécialités (Foëx, Remy-Gennete, Flahaut) ; Michel, qui étudie des oxydes métalliques, est classé en métallurgie...

⁸ « Entre les ouvrages didactiques proprement dits et les encyclopédies chimiques, on doit trouver la place d'un *Traité de Chimie minérale*, assez développé pour donner une idée complète de cette Science, mais assez concis pour pouvoir être facilement diffusé dans les laboratoires de toutes tendances. » [Pascal, 1932-33, p. 1]. Les différentes « tendances » ne sont pas clairement définies mais elles peuvent être rapprochées des « affinités » déjà mentionnés.

⁹ « L'obéissance à une classification naturelle, comme celle qui est offerte par les colonnes verticales du tableau périodique, fait bien intervenir une caractéristique profonde de ces éléments, mais ne satisfait pas toujours le point de vue du chimiste, qui aime à rapprocher les corps possédant le plus grand nombre possible de propriétés analogues. » [Pascal, 1932-1933, p. 3]. On trouve par exemple dans le tome V : carbone, silicium, titane, germanium (le titane n'appartient pas à la même colonne) puis zirconium, celtium, ammonium.

¹⁰ On pourrait que l'organisation du *Pascal* de 1932 est désuète vers 1950 mais, premièrement, le nouveau *Pascal* de 1956 reprend la même présentation par catégories [Pascal, 1956-1967] et, deuxièmement, les ouvrages

diverses industries (l'« industrie de l'acide sulfurique » avec le « soufre » par exemple (tome II)). Enfin, le manuel inclut aussi le « verre », les « métaux légers » (tome VII) et les « éléments radioactifs » (tome XII), ce qui montre les liens forts qui unissent les *minéralistes* aux verriers, aux métallurgistes (I.3) et aux *radiochimistes*.

Chacune des parties du *Pascal* est rédigée par un ou plusieurs auteurs choisis pour leurs liens avec les éléments considérés et leur reconnaissance par la communauté. Un même auteur doit pouvoir écrire sur les complexes en solution, la réactivité gazeuse ou les propriétés d'un solide pour un élément donné.¹¹ Un tel impératif indique une polarisation de la chimie minérale beaucoup « élémentaire » (c'est-à-dire en fonction des éléments du tableau périodique) que lié à l'état physique de la matière. De manière générale, la spécialisation est faible, les *minéralistes* essaient de rester généralistes. Au niveau individuel, le solide n'est toujours pas un sujet excluant les autres « tendances » parce que le "bon chimiste" garde un œil sur les domaines connexes au sein de la chimie minérale.¹²

II.1.1.3. Éclectisme des laboratoires de chimie

Entre la mer disciplinaire et l'écume individuelle dérivent des laboratoires. Analyser la production de ceux qui étudient les solides permettra peut-être d'inférer une représentation des solides – s'ils en ont une – au sein de la chimie minérale. L'annexe A.II.2 détaille, pour l'année 1947-1948, les études menées au sein de quelques laboratoires académiques, classés en chimie minérale et ayant un lien avec l'étude des solides. Elle permet de saisir la diversité des travaux entrepris au sein d'un même laboratoire. L'exemple le plus frappant est sans doute celui du Laboratoire de chimie minérale de Paul Lebeau à la faculté de pharmacie de Paris. Des travaux portent sur des champs très différents [CNRS, 1949b ; Lebeau, 1950, p. XVIII et XXII] :

- 1) des réactions (« pyrogénéation ») et des techniques (« fours à arc » et « sous-vide ») de haute température ;
- 2) l'analyse de gaz ;
- 3) les solutions liquides (« séparation de l'ion phosphorique et de l'uranium », « dosage par oxydation différentielle des ions sulfures ») ;
- 4) des alliages métalliques binaires (« tellure-molybdène », « tellure-tungstène ») ;
- 5) des oxydes, sulfures et halogénures métalliques (solides) ;
- 6) un élément : le « fluor » et ses « dérivés ».

de cours édités dans les années 1950 reprennent la même organisation par familles de composés, par exemple [Michel, 1945-1960].

¹¹ Ainsi Chrétien rédige le chapitre « chlore » [Pascal, 1932-1933, tome I, p. 479-579], F. Bourion rédige la partie sur les « éléments des terres rares » [Pascal, 1932-1933, tome VIII]. Malgré l'éclectisme exigé, chaque auteur n'est pas forcément spécialiste de tous les corps ni de tous les états que forme l'élément. Sans avoir mené des études dans tous les domaines correspondants, l'auteur doit être en mesure d'établir un discours non remis en question et une bibliographie pertinente du domaine.

¹² Le « bon » fait référence à la sélection induite par le choix des rédacteurs. Qui les choisit et pour quelles raisons ? Très probablement, c'est Pascal (est-il aidé, conseillé ?) qui fait la sélection des auteurs. Au moment de l'édition, il détient la chaire de « chimie minérale » de la Sorbonne depuis trois ans [Charle & Telkes, 1989, p. 214-216]. On peut penser que, disposant d'un large choix d'auteurs intéressés pour participer, Pascal va opérer une sélection en choisissant ceux qu'ils considèrent comme les meilleurs. Étant lui-même installé dans le temple parisien, il est probable que ces choix correspondent grosso modo aux critères de la communauté française de chimie minérale. Ainsi, entre-deux-guerres, la communauté des *minéralistes* français favorise l'éclectisme plutôt que la spécialisation outrancière, en particulier l'étude des solides fait partie d'un ensemble de questions plus vaste.

Autour de 1950, ce laboratoire développe des appareils produisant de haute température (1) qui conduisent à l'étude de composés à haute température (1, 4, 5), mais il explore aussi la chimie générale (1), la métallurgie (4), la chimie en solution (3), la chimie analytique (2, 3), la chimie des gaz (2) et s'attache en particulier à un élément particulier : le fluor (6). Or, ce laboratoire est reconnu au sein de la chimie minérale, ce qui suggère que la diversité des activités est valorisée vers 1950. En effet, cet exemple constitue plus un cas typique au sein de la communauté des *minéralistes* qu'un cas particulier isolé.¹³

La multiplication des voies de recherche dans un même laboratoire n'est pas, semble-t-il, propre à la chimie minérale. Ainsi, certains laboratoires de chimie organique tournent une partie de leurs recherches vers d'autres horizons. Le Laboratoire de chimie organique, dirigé par Jean Amiel à Poitiers, fournit un exemple probant (A.II.2.). Alors que sa principale activité est la chimie organique – comme son nom l'indique –, le laboratoire mène des recherches de chimie générale sur la cinétique de réactions catalytiques (les réactifs étant des « hydrocarbures ») et de chimie minérale sur des composés solides (« chromates » métalliques anti-oxydants).

En résumé, vers 1950, la chimie universitaire se présente comme une vaste communauté structurée selon quatre principales sous-disciplines. Malgré des différences institutionnelles marquées, leurs frontières sont fluctuantes et poreuses : les échanges de méthodes et d'objets d'étude sont courants ainsi que les migrations individuelles.¹⁴ La sous-discipline « chimie minérale » constitue un ensemble hétérogène où s'entrechoquent de nombreuses « tendances » ou « affinités » particulières : chimie en solution (ions, complexes, sels*), chimie des gaz, chimie des hautes températures, métallurgie, cinétique et analyse chimiques, électrolyse, thermodynamique, catalyse*. Celles-ci peuvent être complémentaires au sein d'un même laboratoire et s'articulent même parfois dans le travail d'un seul individu. La diversité des études entreprises à ces trois niveaux – sous-discipline, laboratoire, individu – suggère une réalité quotidienne qui transcende les divisions institutionnelles et favorise un brassage entre sous-disciplines. L'éclectisme l'emporte sur la spécialisation disciplinaire. L'état physique de la matière n'est alors pas un critère pertinent de démarcation en chimie. On lui préfère, et de loin, une classification suivant la composition chimique des objets : organique, minéral, biologique. Les solides sont étudiés de manière parcellaire, locale, sans approche globale de l'état solide. Mais ce sont bien les minéralistes qui s'intéressent le plus aux solides pour eux-mêmes : les organiciens construisent des molécules, les biochimistes font cristalliser les molécules du vivant uniquement pour caractériser leurs structures, et les physico-chimistes, lorsqu'ils se penchent sur les solides (ce qui est rare) ne le font que pour traquer des phénomènes physiques.

¹³ Cette assertion est étayée par l'annexe A.II.2, en particulier par des laboratoires comme celui de Fernand Gallais qui développe des recherches sur les complexes en solution en même temps que des études métallurgiques sur la composition et la structure d'alliages tels que les nitrures, carbures, phosphures...

¹⁴ Outre les comportements individuels – comme Amiel et d'autres – qui se positionnent à travers les sous-disciplines, au sein même des institutions les limites des sous-disciplines fluctuent. À l'Académie des sciences, il n'existe qu'une seule section – la VI – pour toute la « chimie », sans spécialisation. Au Comité national du CNRS, la section « chimie physique – chimie minérale » ne fait qu'une [CNRS, 1949a]. La métallurgie appartient mais elle est parfois considérée comme à part [CNRS, 1949b]. Certains laboratoires des universités s'appellent simplement « laboratoire de chimie » ou d'« enseignement » ou « P.C.B. » [CNRS, 1949b].

II.1.2. À la rencontre de groupes étudiant les solides en chimie minérale

L'approche disciplinaire frontale (II.1.1) a étendu à la chimie la dimension fragmentée et transversale des solides en sciences expérimentales (I.3). Elle a mis en évidence le rôle central joué par la chimie minérale vis-à-vis des solides (II.1.1.2). Enfin, elle s'est avérée trop rudimentaire pour dégager des particularités épistémologiques et méthodologiques pour l'objet solide. Dépassant l'analyse institutionnelle, je me lance ici dans un inventaire des composés solides que les *minéralistes* français (hors industrie) étudient vers 1950. Pour répertorier les productions locales des laboratoires, j'ai retenu trois critères de classification : la composition élémentaire des composés, les familles scientifiques aux prises avec les solides minéraux, les thèmes trans-disciplinaires impliquant les solides. Dans quelles mesures ces regroupements sont-ils des reconstructions idéelles a posteriori ? Ont-ils une matérialité sociale et historique ? À travers ces deux interrogations, l'objet « solide » jusque-là abstrait va s'incarner dans une réalité sociale. Il restera alors à se demander si ces trois critères sont suffisants pour recouvrir l'ensemble des minéralistes liés aux solides.

II.1.2.1. La composition élémentaire comme voie d'entrée épistémologique

L'élément chimique est la référence des chimistes français au début du vingtième siècle [Claro-Gomès, 2003] et continue d'être utilisé dans les classifications de chimie minérale jusque dans les années 1950, voire au-delà [Pascal, 1956-1967]. Il peut servir d'outil épistémologique pour classer les solides puis d'outil sociologique pour repérer leur occurrence dans la communauté. L'annexe A.II.3 répertorie vingt et un laboratoires français de chimie étudiant les solides autour de 1950. La cinquième colonne intitulé « nature des composés solides » permet de tracer le tableau suivant :¹⁵

Métaux	Ø	Alcalins, alcalino-terreux	Transition	Terres rares	Al, B
Non métaux					
Ø		(1)	6	(1)	1 (1)
N, P, C	1 (1)		2		
Soufre			4	1	
Oxygène			6		1
Halogènes			2		
« -ates »	(3)		2		

Que peut-on dire de cette répartition élémentaire des solides recensés ? Premièrement que les métaux de transition sont de loin les plus étudiés (deux tiers des études). Au sein de ce vaste ensemble, c'est le fer qui occupe une place centrale, en particulier dans les oxydes de fer et les aciers. On remarque que ces deux types de composés sont aussi étudiés par ailleurs par

¹⁵ Le tableau offre une image simplifiée mais synthétique de certaines données de l'annexe A.II.3. Sa structure à deux dimensions s'adapte aux corps purs et aux composés binaires du type M-nM (Métaux-non Métaux), qui sont aussi les plus étudiés. Horizontalement sont placées les diverses catégories de métaux «M» (électropositifs) et verticalement les éléments non métalliques ou plus électronégatifs que les métaux : « nM » (l'abréviation « -ates » regroupe silicates, aluminates et phosphates). À l'intersection des colonnes « M » et des lignes « nM », chaque case donne le nombre de laboratoires étudiant le composé correspondant. Pour la colonne « Ø », le nombre indique l'étude du métal (ou de son oxydation) s'il est indiqué tel quel ou l'étude de l'élément et de ses divers composés s'il est entre parenthèses.

deux autres communautés des sciences expérimentales : en « physique du magnétisme » et « sidérurgie » (I.3.1).

Physiciens et chimistes travaillent sur les oxydes métalliques composés, à la même époque. L'exemple le mieux connu est celui de Félix Bertaut : chimiste de formation, il rejoint après-guerre Grenoble et le Laboratoire d'électrostatique et de physique du métal (LEPM), dirigé par Néel.¹⁶ Par la suite, il s'intéresse particulièrement à la famille des « ferrites », de formule Fe_2O_3MO (avec M, un métal bivalent). Ces ferrites étaient déjà étudiées à Strasbourg avant 1950, par un chimiste, Hubert Forestier, avec lequel le LEPM va collaborer, à partir de 1954, uniquement pour lui faire fabriquer des ferrites de terres rares [Pestre, 1990, p. 55]. Le physicien a fait appel au chimiste pour une synthèse particulièrement délicate.¹⁷ Malgré des objets chimiques semblables, les liens entre les deux communautés paraissent ténus, ponctuels, individuels.¹⁸ Est-ce dû au profond clivage entre physique et chimie de l'université française ? Ou plutôt à des différences méthodologiques, des finalités divergentes ? Les chimistes se concentrent sur la synthèse et l'analyse chimiques (LCSCE, LCTC) et parfois sur l'étude des propriétés physiques et de la structure des composés. Les composés solides les intéressent comme objets matériels, pour eux-mêmes. La notion de « pureté » y est cruciale : c'est la capacité à obtenir des composés purs qui fait la valeur du chimiste [Lebeau, 1950 ; Chaudron, 1954].¹⁹ En revanche, les physiciens mentionnent très rarement la partie synthétique. Ils insistent sur la propriété physique, leur but étant de caractériser le phénomène en-dehors de la matière qui l'induit.²⁰ Les oxydes des métaux de transition – et les composés solides en général – constituent qu'un moyen pour le physicien alors qu'ils sont une finalité pour le chimiste. Cette différence épistémologique dans les objectifs suffit-elle à expliquer la quasi absence de collaborations ? Faut-il y voir plutôt une méfiance réciproque ou une royale indifférence ? Question ouverte.

Avec la sidérurgie, les liens sont plus nombreux et s'expriment à tous les niveaux : individus, laboratoires, congrès, revues, industries (publique et privée). C'est essentiellement

¹⁶ Félix Bertaut constitue l'exemple (unique à l'époque ?) d'un chimiste au pays des physiciens. Chimiste de formation (École de chimie de Bordeaux), il travaille au Laboratoire central des services chimiques de l'État (LCSCE) durant la guerre (1943-1945) où il masque sa confession juive. Autodidacte en mécanique quantique, il est recruté par Louis Néel en 1945 pour « installer une station de rayons X pour des études de structure » dans son laboratoire de Grenoble. Il se tourne alors vers l'étude structurale des ferrites et reçoit un « crédit exceptionnel » de un million de francs en 1949 (soit un peu plus de vingt mille euros 2006) pour son équipe [Pestre, 1990, p. 35]. Bien que Bertaut œuvre dans un laboratoire et une section de cristallographie du CNRS, ses travaux apparaissent aussi en « chimie minérale », affinité « préparation et propriétés » [CNRS, 1949b] (A.II.2. et A.II.3). Son rôle de passerelle et son impact sur la communauté des chimistes ne doit pas être surestimé : « Bertaut n'appartenait pas à la Société Française de Chimie. [...] Il étudiait les mêmes sujets mais pas dans la même communauté : physiciens et chimistes étaient séparés. » [I Lucas, 2005, p. 7].

¹⁷ « Les propriétés d'une nouvelle série de composés ferromagnétiques, les ferrites de terres rares découvertes et préparées à l'Institut de Chimie de Strasbourg, ont révélé, entre autres, le deuxième exemple d'un curieux phénomène de double ferromagnétisme prévu théoriquement en 1947 par M. Néel. » [RA CNRS, 1954].

¹⁸ De manière symétrique, Jacques Aubry est intimement lié aux physiciens du magnétisme durant sa jeunesse puisque c'est le premier collaborateur de Néel (1940-1943) au laboratoire de Weil à Strasbourg. Chimiste de formation : il présente en 1941 à Grenoble une thèse de chimie intitulée « Etude du nickel et du fer de Raney : applications en chimie minérale », il appartient ensuite clairement à la communauté des chimistes en tant que directeur d'un laboratoire de chimie à Nancy en 1950 (annexe A.II.3). Néanmoins, au moins jusqu'en 1958, Aubry reste en contact personnel et en très bons termes avec Néel [Pestre, 1990, p. 29, 135].

¹⁹ Par exemple, le travail d'André Morette (du laboratoire Lebeau) est résumé ainsi : « Ses travaux ont eu principalement pour objet la chimie du vanadium, dont il a étudié les oxydes et les composés halogénés. La préparation de cet élément dans un état de grande pureté, lui a permis d'en préciser les propriétés et d'accroître nos connaissances sur ses composés binaires » [Lebeau, 1950, pXVIII].

²⁰ Le cas du LEPM est tout à fait typique puisque Néel reçoit le prix Nobel pour sa théorie du « ferrimagnétisme » (généralisation de l'anti-ferromagnétisme) seulement après que le phénomène a été mis en évidence expérimentalement dans des ferrites de terres rares synthétisés par Bertaut (qui n'est pas conjointement récompensé avec Néel).

la « Chaudronnerie » qui a développé ces relations (II.2).²¹ Pourtant certains laboratoires de chimie travaillent sur des alliages métalliques, surtout des binaires. Leur travail consiste en des analyses chimiques suivies de tracés de diagrammes de phase. Le plus souvent, ils ne travaillent pas sur l'aspect mécanique (propriétés et microstructure) des alliages comme le font les métallurgistes mais cherchent simplement à synthétiser des alliages nouveaux, avec une pureté accrue : tellure-tungstène, vanadium-carbone... [Lebeau, 1950, p. XVIII]. Ainsi, comme dans le cas de la physique du magnétisme mais avec des échanges plus nombreux, les chimistes s'intéressent aux mêmes composés (alliages métalliques) que les métallurgistes avec des méthodologies et des objectifs différents.

Deuxièmement, certains chimistes focalisent leurs études sur des composés solides spécifiques. Ces composés sont tellement spécifiques parfois qu'ils sont les seuls à les étudier au niveau national : leur réputation se construit alors sur un seul type de composé. Ces composés paraissent exotiques à une époque où la déferlante des oxydes des métaux de transition et des aciers inonde le marché. Ces programmes de recherche très individuels concentrent des travaux autour d'un seul élément chimique (B, Al, C), d'une famille élémentaire aux propriétés voisines (terres rares, alcalins et alcalino-terreux) ou d'un type de composés (aluminates, phosphates, sulfures). Leur objectif est essentiellement tourné vers la synthèse, en particulier la priorité est donnée aux critères de « pureté » et de « nouveauté ». Après-guerre, ces programmes restent présents, insufflés par la génération des chimistes d'entre-deux-guerres.²² La primauté de la synthèse s'accompagne d'une diversité des objectifs suivis suivant les laboratoires ou les composés solides : analyse chimique ou structurale ; diagrammes de phase ; mesures de constantes physiques (thermodynamiques, électriques, magnétiques) ; étude de la réactivité. Parmi ces solides spécifiques, certains intéressent aussi les autres sciences expérimentales : l'aluminium pour les physiciens et les métallurgistes, les silicates pour les cristallographes, le carbone pour les physico-chimistes et les cristallographes (I.3). Au contraire, d'autres éléments comme les sulfures de terres rares, le bore demeurent chasse gardée des minéralistes.

²¹ Les liens que j'ai trouvés en dehors de la « Chaudronnerie » sont moins nombreux et peu convaincants. Début 1944, lors d'un cycle « Métallurgie » organisé par le « centre de perfectionnement technique », Trombe et Jean-Lucien Andrieux (électrochimiste de Grenoble) présentent trois des cinq « cours-conférences » [*Métallurgie*, 1945]. Lebeau co-dirige le « Conseil scientifique des Etablissements Kuhlmann » – auquel Pascal appartient aussi – [Morette, 1959, p. 15]. L'IRSID collabore ponctuellement avec l'École de chimie de Nancy [MIN, 1953].

²² L'exemple du laboratoire Hackspill met en évidence les différents points développés. C'est un laboratoire prestigieux de la Sorbonne qui offre un exemple des trois types de regroupement. Autour de 1950, Louis Hackspill est l'un des mandarins de la chimie française : titulaire de la chaire de « chimie minérale » de la Sorbonne et directeur du laboratoire associé depuis 1939 (en remplacement de Pascal), il a pris la succession d'Urbain à la direction de l'Institut de chimie de Paris (1939-1950) puis a été élu membre de l'Académie des sciences en novembre 1944 (puis président en 1961) [Charle et Telkès, 1989]. Membre influent du Comité national dans la section « chimie minérale » qu'il dirige à la fin des années cinquante, il est considéré comme l'un de « nos grands Maîtres de la Chimie minérale » [Lebeau, 1950, p. X-XI] un an avant sa retraite officielle (1951). Ses travaux touchent à trois domaines principaux : 1/ synthèse du « bore » (la seule mention que j'ai trouvée pour cet élément dans tous les documents consultés) puis étude de ses propriétés et des dérivés ; 2/ préparation des métaux alcalins et alcalino-terreux « à l'état de grande pureté, [...] mesure de leurs constantes physiques, [...] étude de certains équilibres, [...] obtention de composés nouveaux », domaine qui a fait sa notoriété [Lucas, 1966] ; puis 3/ (après 1938), étude des phosphates (solide) et de l'acide phosphorique (en solution). Dans chaque cas, les composés chimiques peuvent être soit solides, soit en solution, ce qui confirme la non pertinence du critère état de la matière en chimie minérale avant 1950. La diversité n'est pas considérée comme un problème : « il n'existe aucun lien entre la préparation des métaux alcalins et celle du bore [...], si ce n'est le souci d'obtenir des corps purs » [Hackspill, 1938, p. 5-6]. Hackspill affirme donc lui-même la primauté de la synthèse (pureté et nouveauté). Dans une moindre mesure, il s'attache à la détermination de constantes physico-chimiques (thermodynamiques, d'équilibre), de la réactivité des corps mais ne s'intéresse pas à la structure des solides. L'un de ses étudiants, Albert Hérol, se lance au début des années cinquante sur l'étude des composés d'insertion du graphite.

Troisièmement, deux groupes de composés solides, très importants en physique, ne sont pas étudiés par les chimistes français autour de 1950 : les halogénures alcalins d'un côté, le germanium et le silicium de l'autre. Les halogénures alcalins ont servi de base aux études pionnières de diffraction et de spectroscopie de rayons X dès 1912-1913 [Ewald, 1962, chapitre 5] parce qu'ils étaient facilement accessibles sous forme de gros monocristaux (centimétriques). Par la suite, comme leur structure est simple, leur composition chimique bien définie, ils ont été choisis entre-deux-guerres comme les solides de référence par les physiciens [Hoddeson, 1992, p. 242-259]. Ne présentant aucun des intérêts de matrice disciplinaire des chimistes : nouveauté ou pureté, ils ne sont pas étudiés par les minéralistes français.

Le cas du germanium et du silicium est plus intéressant. L'« invention du transistor, fin 1947 » aux Laboratoires Bell de la firme électronique AT&T lance rapidement l'étude des semi-conducteurs, en particulier celle du germanium, avec une avance nette pour les États-Unis. En France, le démarrage après-guerre est hésitant, confiné à la physique, clairement inspiré par la physique états-unienne. Un seul groupe universitaire – celui de Pierre Aigrain au laboratoire de physique de Rocard à l'ENS Ulm (I.3.1) – y est engagé, ainsi que quelques petites équipes de laboratoires industriels, en particulier ceux du Centre national d'études en télécommunications (CNET) et de la CSF avec lesquels collabore étroitement le groupe Aigrain [Pestre, 2004]. À l'initiative du projet, on trouve Aigrain et Dugas, deux physiciens qui ont fait un séjour prolongé outre Atlantique.²³ Néanmoins, le premier verrou technologique essentiel est une synthèse chimique : il s'agit de maîtriser la cristallogenèse du germanium, c'est-à-dire savoir faire pousser des monocristaux les plus purs et les plus gros possibles. Les physiciens et les industriels ignorent ce savoir-faire de pointe. Pour la collaboration ENS-CNET, ce sont les industriels qui vont assurer la partie chimique même si les ingénieurs du CNET ne savent pas faire. Comment vont-ils pallier le manque de savoir-faire chimique ? Remarque extrêmement importante : ils ne se tournent pas vers les chimistes français et préfèrent enrôler deux chimistes allemands : Immanuel Franke et H. Welker, « récupérés » après-guerre par Rocard et Degas, qui participent à la « mission du CNRS en Allemagne » de 1945 à 1950 [Bernard, 1996].²⁴ Ce sont deux spécialistes de cristallogenèse : Franke pour le « quartz » (utile pour le matériel piézoélectrique) et Welker pour le « germanium ». Le laboratoire associe des salles de mesures physiques (70m²) : « électriques » et « structura[les] – rayons X, microscopie électronique » et des salles de chimie (18m²) : « préparations chimiques, cristallogenèse » au sein d'une seule et même entité [Licoppe, 1996]. Cette organisation qui associe physiciens et chimistes en un même lieu est extrêmement rare en France – comme le montre aussi l'exemple atypique de Bertaut –. Vient-elle de l'influence allemande ? Ou plutôt des États-Unis ? Il semble que ce soit plutôt l'influence états-unienne qui prévaut pour l'organisation de la recherche sur les semi-conducteurs [Pestre, 2004].

Néanmoins, une question reste en suspens : pourquoi ne pas prendre des chimistes français ? Qu'est-ce qui empêche le CNET de recruter des *minéralistes* pour faire de la cristallogenèse ? Cette question renvoie à trois types d'interrogation :

- 1) Pourquoi choisir français quand on a mieux et moins cher sous la main ? La chimie allemande est réputée être la meilleure au monde en synthèse minérale. Pour preuve, après la victoire des Alliés, lorsque les États-Unis

²³ Ce sont Aigrain et son collaborateur Claude Dugas qui viennent de passer un an aux États-Unis. À leur retour, ils lancent le groupe chez Rocard. Ceci est un indice fort pour comprendre premièrement la réussite du laboratoire de l'ENS, qui, engagé tôt, est performant à court terme, et deuxièmement pour avoir une idée de l'avance états-unienne dans le domaine des semi-conducteurs par rapport à la France (et à l'Europe de manière générale ?).

²⁴ Le CNRS a délégué une mission de scientifiques en Allemagne pour récupérer du matériel, des informations dès le printemps 1945 puis des scientifiques allemands à partir de juillet 1947 [Ludmann-Obier, 1989 ; Defrance, 2001].

désirent récolter les résultats de la science allemande (projet FIAT), c'est l'ouvrage d'*Inorganic chemistry*, très conséquent, qui est édité en premier en 1948.²⁵ D'autre part, dans quelle mesure le choix des deux scientifiques allemands n'est-il pas dicté par leur position de dominés ? Ces vaincus ne sont-ils pas infiniment plus manœuvrables qu'une communauté française de chimie minérale structurée et puissante ?

- 2) Quelqu'un possède-t-il le savoir-faire en France pour faire pousser des monocristaux de germanium ? La cristallogenèse est une activité rarement mentionnée, développée uniquement pour des métaux plus « classiques » tels que l'aluminium. Je ne trouve aucune mention de monocristaux de germanium synthétisés par des minéralistes français.
- 3) N'aurait-on pas pu utiliser le savoir-faire français en cristallogenèse classique et l'adapter au germanium ? En utilisant la bibliographie disponible – le *rapport FIAT* [FIAT, 1948] par exemple –, des minéralistes auraient probablement pu reproduire ce qui se faisait ailleurs. Certes, mais l'avantage des chimistes allemands est qu'ils sont en contact avec les physiciens, ils sont proches de Rocard – à sa discrétion en quelque sorte –. Connaît-il aussi bien les chimistes français, proches par la langue mais loin par les institutions ? Probablement non : le cas de la « physique du magnétisme » montre que les relations entre physiciens et chimistes sont rares – quelques individus – alors même qu'ils travaillent sur les mêmes composés solides. Le grand écart nécessaire pour que chimistes et physiciens français se rejoignent est probablement encore plus vaste.

L'unité épistémologique du concept de solide se heurte aux courbes de niveaux sociologiques de l'objet. Les découpages suivant le tableau périodique prennent en compte la résistance du monde réel et rendent compte partiellement de sa rugosité (le regroupement suivant les propriétés chimiques par exemple). Mais ils ne dessinent pas à proprement parler des regroupements sociaux. L'état des lieux universitaires (I.2), l'approche disciplinaire (II.1) et la classification élémentaire suggère au contraire que les acteurs des solides en chimie minérale sont organisés suivant des groupes plus pertinents, dont je vais faire l'inventaire par la suite.

II.1.2.2. La famille scientifique comme cellule sociale structurante

Vers 1950, la chimie minérale française fait partie de la tradition chimique : son ancienneté est grande, ses institutions stables et pérennes, ses objets bien définis, son territoire identifiable. Au sein de cet espace, la famille scientifique constitue l'un des groupes sociaux

²⁵ Après la Seconde Guerre mondiale, les États-Unis profitent de la victoire écrasante des Alliés et de l'occupation de l'Allemagne pour organiser une vaste enquête sur les recherches scientifiques allemandes durant les années d'autarcie et de secret : c'est la *Fiat review of German Science 1939-1946*. Dans chaque domaine sélectionné (biologie, chimie, mathématiques, médecine, physique, sciences de la terre), des scientifiques allemands sont choisis pour répertorier les connaissances, établir une bibliographie et rédiger un « compte-rendu, à la fois complet et concis, des investigations et progrès purement scientifiques », sous la direction d'un « senior author ». Après deux ans d'enquête, en 1948, l'*Office of Military Government for Germany* fait éditer ces ouvrages et les distribue « pour renseigner la science internationale ». L'ouvrage d'*Inorganic chemistry*, publié en premier, est dirigé par Willhelm Klemm (*Institut für anorganische Chemie der Universität Kiel*) [FIAT, 1948]. Pour avoir une idée de sa distribution en France, j'ai trouvé l'ouvrage d'*Inorganic chemistry* répertorié par le moteur bibliographique « SUDOC » en 2006 – soit près de soixante ans après – dans quatre bibliothèques universitaires françaises : Grenoble, Lille, Mulhouse, Paris.

les plus pertinents. Jusqu'à présent, j'ai souvent mentionné des mandarins influents sans nécessairement les localiser dans l'espace relationnel global. Le tableau construit ci-dessous en utilisant toutes les sources dont je disposais a pour but de tracer cet espace relationnel familial de la chimie minérale française en lien avec les solides autour de 1950. Partiel et partial, il a au moins le mérite de montrer des familles en exercice, de mettre en évidence des relations filiales (au sens de la formation et non pas organique). Ce faisant, il offre une vue panoramique du système mandarinal.²⁶

Ancêtres (1900)	1 ^e génération (avant-guerre)	2 ^e génération (entre-deux-guerres)	3 ^e génération (après-guerre)
Le Chatelier Henry (1887)		Chaudron Georges (1921)	Forestier Hubert (1928) Michel André (1937) Bénard Jacques (1939) Faivre René (1944) Lacombe Paul (1944)
		Laffitte Paul (1925)	
		Mondain-Monval P. (1924)	Pâris René (1934)
Moissan Henry (1880)	Lebeau Paul (1900)	Jolibois Pierre (1910)	André Boullé
		Damiens Augustin	
		Bedel C.	
		Picon Marius (1919)	
	Hackspill Louis (1911)	Morette André	
		Paul Remy-Genneté (1933)	Besson Jean (1946) Cueilleron Jean Lucas René
Friedel Charles (<1870)	Urbain Georges (1899)	Chrétien André (1929)	Laurent Pierre (1938) Rohmer Raymond (1939) Tridot Gabriel (1949)
		Trombe Félix (1935)	
		Foëx Marc (1939)	
		Georges Champetier	
	Pascal Paul (<1920)		
		Andrieux Lucien (1929-Paris)	
			Eyraud Charles (1949-Lyon)
			Aubry Jacques (1941-Grenoble)

²⁶ La sélection des noms dans le tableau est guidée par un principe méthodologique : priorité est donnée aux chimistes déjà mentionnés (chapitres I et II), et par la contingence due aux sources que j'ai consultées. Je construis une génération suivant la date de soutenance de thèse (donnée entre parenthèses) et suivant la filiation avec le patron de thèse. Tous les individus mentionnés ici ont soutenu leur thèse avant 1950. Les démarcations familiales ne sont pas aussi hachées que ne le suggère le tableau : par exemple Jolibois commence sa thèse avec Lebeau mais la termine avec Le Chatelier [Lebeau, 1950, p. XIII].

Une étude plus approfondie pourrait montrer dans quelles mesures chacune de ces familles scientifiques a développé un style de recherche propre au sein de l'espace national et peut se revendiquer comme « école de recherche » [Geison, 1981]. Les cas de la « Chaudronnerie » (II.2.) et de la « Chrétienté » seront abordés plus en détails du fait du lien fort avec la « chimie du solide » que leur prêtent les témoignages recueillis.²⁷ Les familles scientifiques attachées aux noms de Lebeau et de Trombe vont aussi être abordées en tant que constitutives de la « communauté des hautes températures » (II.3).

II.1.2.3. Des thèmes de recherche dans la diagonale disciplinaire

Au fil des textes consultés, des chimistes de familles différentes emploient de manière récurrente des expressions qui structurent différemment du tableau périodique les composés chimiques. Ces mots clés ne sont pas basés sur la composition chimique des solides mais sur une finalité différente : propriété chimique, physique ou application sociale. Ils offrent une troisième manière d'envisager les solides en chimie minérale. Les scientifiques ne se regroupent alors plus autour d'un solide élémentaire ou d'une affinité héritée de la formation mais autour d'un impératif sociocognitif assumé. Je qualifie ces thèmes de recherche de « transverses » parce qu'ils sont en travers du tableau périodique, de l'échiquier familial et des pliages universitaires. Ils courent sur les diagonales des autres polygones sociaux ou cognitifs.

En examinant l'annexe A.II.1, on peut repérer trois thèmes transverses principaux en lien avec les solides vers 1950 :

- 1) la « radiochimie » développée au Laboratoire de chimie nucléaire du Collège de France (dirigé par Frédéric Joliot, travail de Pierre Süe) et à l'« Institut du Radium » (dirigé par Irène Curie, travail de Rachelet sur l'uranium) ;
- 2) les composés « réfractaires » au Laboratoire des hautes températures à l'ENSCP (travail de Marc Foëx sur la zircone et le graphite), au Laboratoire de chimie de l'ENSCS (travail de Vermeillet sur les « silico-alumineux »), au Laboratoire de chimie C de la Sorbonne (travail de Bréfort sur la « thermolyse » des solides) ;
- 3) les « réactions dans l'état solide » au Laboratoire central des services chimiques de l'état, au Laboratoire de chimie organique de Poitiers (études cinétiques de Jean Amiel et travail de M. Nortz contre la corrosion des alliages), au Laboratoire de chimie de Lyon (travail de Jacques Bénard sur les oxydes métalliques), au Laboratoire de chimie de l'ENSCS (travail de Forestier sur les « réactions entre solides »).

Ces trois thèmes ne sont sans doute pas les seuls en lien avec les solides. J'exclue la « radiochimie » du cadre de mon étude parce qu'elle présente une autonomie disciplinaire qui la distingue nettement [Boudia, 2001]. Je considère en revanche les deux autres thèmes comme essentiels pour l'émergence de la chimie du solide. L'un sera envisagé comme une aventure

²⁷ La filiation directe de la chimie du solide avec ces deux empires est explicitement reconnue par les témoignages des héritiers (chapitre III). La focalisation des témoins sur la chimie du solide est telle parfois que ces familles sont présentées comme les deux seuls groupes sociaux dominants de la chimie minérale : « Quand je suis arrivé [fin des années 1950], la chimie minérale était divisée entre ce que nous appelions familièrement – et irrévérencieusement – entre nous, la *Chrétienté* et la *Chaudronnerie*. » [I Pouchard, 2004, p1].

« interstitielle » (II.3), l'autre dans sa dimension de communauté internationale transdisciplinaire (II.4).

En me focalisant sur la chimie minérale en France autour de 1950, j'ai pu repérer trois catégories de classement des solides : classification périodique, familles scientifiques, champs scientifiques transverses (thème restreint ou domaine international). Ces catégories mettent en évidence trois modes distincts de représentation des solides. Le rapport à l'élément constitue un prolongement aux solides du « paradigme » introduit par Mendeleïev pour ordonner la chimie à partir du congrès de Karlsruhe (1860) [Bensaude & Stengers, 1992, p. 178-185]. L'organisation élémentaire organise le solide suivant sa composition chimique mais aussi ses propriétés chimiques. L'hérédité familiale de son côté est issue du mode de formation des universitaires (pour lesquels la thèse constitue un moment important) et de l'organisation mandarinale de la chimie française entre-deux-guerres. L'approche thématique transverse offre des exemples de rassemblement autour de projets d'étude communs qui transcendent l'approche disciplinaire classique et les classifications « élémentaires » et « familiales ». C'est en combinant ces trois modalités sociales et cognitives disjointes qu'on peut redessiner la figure des solides pour les minéralistes français vers 1950.

II.1.3. Vers une définition des solides pour les minéralistes français avant 1950.

Je voudrais ici faire la synthèse des diverses logiques rencontrées (II.1, II.2) à propos des solides afin de rendre compte de leur représentation par les chimistes, en particulier les minéralistes. L'objet solide n'a aucune unité d'ensemble : ni institutionnelle (il se délocalise au travers de plusieurs disciplines et n'apparaît pas au niveau des divisions disciplinaires, les « affinités »), ni épistémologique (il est segmenté en une multitude de cases en partie dérivées du tableau périodique des éléments), ni méthodologique (on trouve mêlées des pratiques de métallurgie, de physico-chimie, de thermodynamique, de cinétique). À tous les niveaux – individu, laboratoire, sous-discipline –, les trois états de la matière peuvent être étudiés dans un même programme de recherche performant. Le solide se rattache principalement à une sous-discipline (la chimie minérale) mais n'a aucune lisibilité disciplinaire. L'état solide est donc une abstraction « transverse » par rapports aux catégories pérennes de la chimie universitaire. En d'autres termes, le solide met une sacrée pagaille dans les tiroirs du laboratoire de chimie même s'il suit à la lettre les quatre commandements de la chimie : « synthèse », « caractérisations », « pureté » et « nouveauté ». Il est par conséquent moins anachronique de parler « des solides » que « du » solide. En 1950, le solide comme état physique n'est pas constitutif de la logique chimique.

Quand on parle de composés solides, le mot « solide » lui-même n'arrive souvent qu'en dernier recours : le premier critère est la formulation élémentaire (« sulfure de fer »), puis générique (« aluminates ») ou plus générale (« minéraux », « métaux »), ensuite on le définit par ses propriétés (« réfractaires ») et enfin seulement, en de rares occasions, par un substantif pluriel (« thermolyse des solides ») ou un épithète singulier (« les réactions dans l'état solide »).²⁸ Le substantif singulier est remarquablement absent du discours des chimistes. Quand ils emploient le mot, c'est rare et toujours au pluriel. Les mots apparaissent encore comme le moins mauvais médiateur vers les choses : l'emploi linguistique du pluriel

²⁸ Pour l'ensemble des descriptions de travaux de recherche de chimie minérale et générale pour (1947-1949) [CNRS, 1949a-b-c], je n'ai repéré que deux occurrences du mot « solide ». Leur apparition plurielle renforce l'argument précédent.

répond à une parcellisation du solide entre les divisions socio-cognitives des chimistes qu'elles soient institutionnelles, épistémologiques ou méthodologiques. Autour de 1950, le solide chimique est un objet psychosocial, hétérogène par tous ses moyens d'expression et ses modes d'existence.²⁹

L'hétérogénéité du langage et des représentations correspond à une multiplicité de communautés des solides. Les repères simples comme la discipline ou l'élément chimique ne suffisent pas. Étudié par des individus sans étiquette, accaparé par des familles scientifiques recomposées, utilisé par groupes transverses, le solide transcende les catégories académiques et offre un maillage confus, de textes et d'instruments, de croyances et d'intérêts, de logiques et d'images dont l'écheveau est inextricable. Quant aux corps socio-cognitifs qui l'étudient, les linéaments de leur visage sont flous, leurs organes amovibles et instables, leurs pensées confuses. Seul le cœur de ces groupes est bien repérable.

Jusqu'à présent, je me suis appliqué à développer des instantanés du solide vers 1950. La multiplication des points de vue sur l'objet solide a permis de faire la connaissance de vastes communautés expérimentales : physique des solides, cristallographie, métallurgie, céramique, verres (I.3) puis de rencontrer la chimie (II.1). La contrepartie d'un large tour d'horizon est le manque de précisions spatiales (les laboratoires n'ont quasiment pas été visités) et de perspectives historiques. À partir de maintenant, l'enquête change de rythme, les aiguilles du temps s'éveillent et les acteurs se mettent en mouvement. N'essayant plus de préciser l'objet solide (II.1.3), je suis les groupes d'acteurs étudiant les solides. Parmi les catégories, je choisis les plus typiques : la « Chaudronnerie » (II.2) pour la famille scientifique ; la Commission des hautes températures (II.3) pour la thématique transverse ; les « réactions dans l'état solide » pour le domaine trans-disciplinaire international (II.4).

II.2. La Chaudronnerie ou la construction d'un empire scientifique en République française (1913-1976).³⁰

Quelques remarques de méthode avant de commencer. La « Chaudronnerie » permet de donner un exemple charnel de famille scientifique. Pourquoi l'avoir choisie plutôt qu'une autre évoquée précédemment ? Parce qu'autour de 1950, c'est la famille la plus influente et la plus productive dans ses recherches sur les solides minéraux. C'est aussi l'une des deux

²⁹ La multiplicité des solides pour la chimie rappelle le passage du singulier « physique du métal » (une conception homogène des métaux) au pluriel « physique des solides » (une conception hétérogène des solides) (chapitre I). Si le pluriel des chimistes est en accord avec leurs pratiques, le cas des physiciens est plus ambivalent : en traquant les phénomènes qu'ils qualifient d'« universels », en voulant les extraire de la matière, en les théorisant par des équations mathématiques générales, les physiciens affirment la continuité de l'état solide [Seitz, 1949] et son unicité. Or, ils recourent à un pluriel qui découpe l'objet.

³⁰ Une histoire du « Centre d'études de chimie métallurgique » (CECM) a certes déjà été écrite avec comme sous-titre : « l'ère Chaudron » [Cornet, 1990]. C'est un récit intéressant et très documenté dans lequel j'ai souvent puisé des informations. Néanmoins, l'auteur n'a pas les mêmes objectifs que moi : rédigée à l'occasion d'une commémoration – les « 50 ans du CNRS » –, dans une revue liée au CNRS – même si la revue dispose d'un comité de lecture sérieux –, par un des membres du CECM, qui a vécu une partie de l'histoire qu'il raconte et connu certains des acteurs, cette histoire est traversée des « paradigmes » de la communauté scientifique et propose un récit non problématique, en faisant la part belle aux grands hommes : Urbain, Le Chatelier, Chaudron. On peut aussi regretter que les nombreuses sources bibliographiques, détaillées à la fin, n'apparaissent pas à l'endroit du récit où elles sont utilisées par l'auteur. Avec mes propres préjugés (à l'intersection des sciences et de l'histoire), je cherche à décrire avec la « Chaudronnerie » la formation d'une famille scientifique particulière et à questionner le contenu du concept lui-même.

familles qui sont citées comme marquant l'« origine » de la chimie du solide (III.1). Comprendre ce qu'elle représente dans les années 1950 nécessite un retour en arrière : j'ai arbitrairement choisi la date de début de thèse de Chaudron comme borne de départ, 1913.³¹ Pour la date de fin, j'ai choisi 1976, qui correspond au décès du maître.

Le présent récit poursuit trois principaux objectifs. Premièrement, repenser à la lumière du « temps long » (non pas séculaire au sens de Braudel mais large de soixante ans) un objet fugace : le solide des chimistes. Ensuite, suivre, étape par étape, la construction d'un « empire scientifique » dans la chimie française tout au long du vingtième siècle (1913-1976). Cette construction rendra plus palpable le concept de famille scientifique et soulignera ses dimensions de luttes et d'entraides sociales (internes et externes), de fécondité et de sclérose cognitives. Enfin, il est essentiel de définir la Chaudronnerie parce qu'elle sert de point d'ancrage à la chimie du solide (chapitre III, IV.3).

Tout au long du récit (II.2), j'appellerai *Chaudronnerie* (en italique) l'objet historique fabriqué à l'intersection de la « Chaudronnerie » vécue par les acteurs [I Pouchard, 2004] et du concept historiographique de « famille scientifique ». Ainsi, la *Chaudronnerie* correspond à la zone d'influence (institutionnelle), de pratiques (scientifique et technique) et d'échanges (communautaires) de Chaudron et de ses disciples. Pour suivre la construction de cet empire dynamique et flou (dans ses limites), je propose une approche descriptive et chronologique. Si Chaudron est le principal protagoniste humain du récit, il n'en constitue pas pour autant le héros du drame : il cèdera la première place à la *Chaudronnerie*. Au niveau méthodologique, le sociologisme prend le pas sur l'individualisme. Le découpage en quatre périodes suit pourtant le parcours individuel de Chaudron : éducation universitaire (1913-1921), premiers pas de chercheurs (1921-1928), postes de direction en province (1928-1939), explosion institutionnelle à Paris (1939-1976). Les différents niveaux d'analyse : institutionnel, disciplinaire, scientifique et technique, développés au sein de chaque époque, ne seront pas toujours distingués. Les pratiques scientifiques et techniques sont détaillées grâce à l'étude de l'énoncé des thèses et diplômes d'études supérieures officiellement dirigés par Chaudron jusqu'en 1954.³²

II.2.1. De la croissance graduelle de l'empire (1913-1950)

³¹ Le choix de la thèse de Chaudron comme point de départ à l'étude de la « Chaudronnerie » est motivé par ma croyance en l'importance primordiale de cet acte clé dans la carrière d'un scientifique. Le récit de la « Chaudronnerie » pourra-t-il justifier a posteriori la place centrale accordée à la thèse ?

³² La date de fin découle des sources disponibles [Chaudron, 1954]. Étudier l'énoncé des thèses n'est pas une pratique courante des historiens des sciences. Cette méthode a pourtant l'immense avantage de fournir une série homogène et ininterrompue d'informations durant une carrière universitaire, de 1913 à 1954 ici. Elle contient néanmoins plusieurs limites : 1) les thèses ne constituent pas toute la recherche d'un laboratoire (une grande partie seulement) mais je suppose qu'elles peuvent révéler les principales orientations du groupe ; 2) l'énoncé du titre ne contient pas l'ensemble de la thèse mais reflète l'état d'esprit du directeur de thèse – ici Chaudron – à une époque donnée (un peu avant la date de soutenance) ; 3) le présupposé de l'omnipotence du maître dans les choix (sujet, énoncé) est discutable mais il est conforté par cette description de la situation en 1950 : « j'ai passé un an à attendre un nouveau sujet de thèse en 1950 : Chaudron était très occupé. Quand Pruna a présenté sa thèse sur les carbonates en 1951, j'ai finalement repris son sujet. Deux points intéressaient Chaudron : la période d'incubation pour faire une comparaison avec l'acier et le frittage que j'étudiais principalement par dilatométrie. » [I Mondange, 2004, p. 3]. Le recours aux énoncés des thèses permet d'obtenir facilement un tracé sommaire de l'évolution de la "conscience" du maître et des pratiques du laboratoire au cours de la période.

II.2.1.1. Un petit étudiant de la grande Sorbonne (1913-1921)

Chaudron grandit au pays des mandarins, à la Sorbonne. À la fin de sa licence ès sciences à Paris (1913), il désire poursuivre en thèse. Suivant la norme en vigueur, il est embauché par l'un des pontes de la Sorbonne : Henry Le Chatelier, titulaire de la chaire de « chimie générale » depuis la mort de Moissan (1907). Le Chatelier est l'un des savants français les plus influents de l'époque : professeur à l'École des Mines de Paris (1878-1919), au Collège de France (1887-1908), académicien (1907-1936). Il pourrait passer pour un mandarin banal, enseignant plusieurs sous-disciplines : chimies minérale, générale et industrielle, et menant des recherches variées : préparation et études des ciments, verres et céramiques (1878-1887), thermodynamique et catalyse des réactions à l'état gazeux (1884-1888).³³ Pourtant, il dirige un laboratoire atypique dans le paysage académique. Tout au long de sa carrière, Le Chatelier prône et pratique l'ouverture et la communication des mondes clos. Il se démarque de la plupart des chimistes de l'époque en menant simultanément des recherches de haut niveau en chimie et en métallurgie. Il fut l'un des principaux artisans au sein de la communauté internationale de l'émergence de la « métallurgie physique » [Chezeau, 2004] à partir de 1880.³⁴ Il se trouve ainsi au contact de théoriciens de la thermodynamique tels Gibbs (qu'il traduit et popularise en France). Il fonde la *Revue de métallurgie* en 1904 puis la dirige pendant dix ans. Son laboratoire de la Sorbonne regorge de problèmes appliqués et d'étudiants étrangers.

Ses envies de décloisonnement sont iconoclastes en France. Sur le modèle de la métallurgie physique, Le Chatelier veut remodeler l'ensemble des rapports entre science et industrie : les sciences, clame-t-il, doivent s'inspirer des problèmes pratiques de l'industrie et réciproquement l'industrie doit avoir recours aux techniques et concepts des scientifiques. Une longue controverse l'oppose au camp de la « science pure » et désintéressée, mené par Urbain et ses amis Jean Perrin et Paul Langevin. Il cherche à promouvoir l'image du savant « expert » ou « consultant » industriel [Letté, 2004, p. 10-11] et à imposer plus d'enseignements pratiques à l'université (moins de cours magistraux d'amphithéâtre et plus de travaux pratiques en laboratoire). Sur le « modèle allemand », il milite pour une « chimie industrielle » et une science « utile » pour préparer les étudiants à l'industrie [Claro-Gomès, 2003]. Il semble l'emporter en 1908 quand une chaire de « chimie appliquée » est créée à la Sorbonne grâce aux financements de la Société Solvay et de la Chambre syndicale des produits chimiques. Urbain le propose même à la chaire mais c'est finalement Camille Chabrié qui obtient le poste en 1909 [Charle, 1994, p. 337]. La frontière entre les universités et l'industrie est pourtant sauvegardée : Urbain et les gardiens du temple finissent par imposer la science pure dans la tour d'ivoire académique et la science appliquée dans les écoles d'ingénieurs [Claro-Gomès, 2003]. Le Chatelier ne désarme pas après la Première Guerre

³³ S'inspirant des travaux de Van't Hoff, Le Chatelier travaille sur la thermodynamique des équilibres gazeux (1884-1888) et énonce la règle du déplacement des équilibres, aujourd'hui apprise en France sous le nom de « loi de déplacement des équilibres de Le Chatelier ». C'est avec son élève Boudouard qu'il étudie des catalyseurs pour réactions chimiques en phase gazeuse [Leicester, 1981].

³⁴ Chezeau [2004] montre que la métallurgie physique, qui émerge après 1860, se construit sous la pression de besoins industriels : le fer s'usant trop vite est remplacé par l'acier, plus résistant, produit en quantité importante grâce à la technique Bessemer à partir de 1880. Or l'acier est mal connu, mal défini, mal reproductible. C'est autour de ce besoin crucial (pour l'industrie) de données sur l'acier que se développe la métallurgie physique par introduction graduelle entre 1880 et 1914 de mesures chimiques (composition), cristallographiques (microscopie optique), thermodynamiques et physiques (mécaniques puis électriques, magnétiques). Le Chatelier est l'un des membres les plus actifs de la communauté internationale de « métallurgie physique ».

mondiale et se fait héraut militant d'une science nouvelle : la « science industrielle » [Letté, 1998], véritable rationalisation de la science sur la base du taylorisme américain.³⁵

Polytechnicien, membre du corps des Mines, Le Chatelier est avant tout un homme de terrain. Étudiant, il évite d'utiliser le concept de force, tout au long de sa carrière ; toute sa vie, il se méfiera de « l'hypothèse atomique » et l'utilisera que comme un outil pratique [Leicester, 1981]. C'est à son laboratoire qu'il se sent le mieux au contact de la matière (synthèse chimique), des instruments (physiques) et des gens intéressés par la recherche. Le temps passé à la paillasse est négligeable devant le savoir-faire transmis à ses élèves : des manipulations minutieuses, un esprit « pratique » et ouvert sur l'industrie, un souci des problèmes appliqués.³⁶ Lui-même concepteur d'instruments, Le Chatelier place l'instrumentation physique au cœur des pratiques chimiques pour caractériser les composés obtenus.³⁷ Il transmet ces valeurs pratiques et décloisonnées à ses nombreux élèves en formant une « école ».³⁸

Quels sont justement les savoirs et savoir-faire partagés au sein du laboratoire vers 1913 ? Au niveau théorique, le maître est sensible à la classification des composés en catégories : « simples », « définis », « solutions solides » (encore souvent appelés cristaux mixtes ou mélanges isomorphes). En tant que métallurgiste, il utilise couramment les « diagrammes d'équilibre » pour décrire les composés intermétalliques, les alliages et les métaux impurs. Il reste hermétique à la nouvelle physique d'après 1900 et l'atome* reste pour lui une hypothèse utile. Sur ces deux derniers points, il partage les idées de la plupart des chimistes français [Claro-Gomès, 2003]. Les composés étudiés sont solides pour la plupart mais aussi gazeux. Sa pratique de la chimie est fortement influencée par des habitudes de métallurgiste. La synthèse et l'étude des composés solides nécessitent des fours à haute température et des thermomètres (d'où son développement du thermocouple). Les métaux et alliages (essentiellement ferreux) sont étudiés de manière macroscopique* : analyse chimique, propriétés mécaniques (traction, dilatométrie), électriques (dès 1890), magnétiques... Les méthodes dilatométriques sont alors plus précises que les procédés magnétiques. La structure microscopique* est photographiée grâce au « microscope métallographique »* inversé – par transmission –, qui depuis 1900 remplace la métallographie par réflexion sur surface polie, moins pratique [Chezeau, 2004, chapitres I et II].

³⁵ Le Chatelier a d'ailleurs été en contact personnel avec l'ingénieur Frederick Taylor. En 1923, il publie l'ouvrage *Science et Industrie*, dans lequel il théorise sa vision de l'application des méthodes de rationalisation industrielle à la recherche scientifique. À partir de 1925, ses thèses deviennent encore plus larges car il cherche à appliquer à tous les domaines de la vie l'idée du taylorisme [Letté, 1998].

³⁶ « S'il est un lieu où Henry Le Chatelier est à son aise, c'est sans nul doute son laboratoire, peuplé de ses étudiants et collaborateurs. [...] Il exige une disponibilité plus grande de ses élèves qu'il initie aux méthodes de mesure et à la recherche. Une importance des manipulations que le professeur aimerait voir grandir. [...] l'étudiant qui, au-delà du diplôme, désire compléter son apprentissage par la recherche, [...] est le seul en fait auquel Henry Le Chatelier accorde véritablement son attention {Letté, 2004, p189}. « Il faut avant tout former des esprits pratiques... [l'enseignement] forme trop souvent des théoriciens, des esprits faux, en un mot le contraire des hommes d'action. » {Le Chatelier, 1926, Introduction (rédigée en 1908)}.

³⁷ Mise au point d'un thermocouple platine-platine rhodié (1887) pour la mesure des hautes températures ; réalisation d'un microscope métallographique à transmission (1900), plus pratique que celui qui existait par réflexion ; amélioration de dilatomètres existant (1900) [Chezeau, 2004, p. 10, 75, 152] & [Bud & Warner, 1998].

³⁸ Letté n'emploie pas explicitement l'expression « école de recherche » mais semble la sous-entendre : « Henry Le Chatelier a constitué autour de lui une équipe significative de disciples pour prétendre au titre d'école. » [Letté, 2004, p. 191]. Léon Guillet, George Charpy, Chevenard, Chaudron et de nombreux étrangers seront ses élèves ou tout moins se formeront dans son laboratoire.

Chaudron est mobilisé en 1914 ; en août, il interrompt sa thèse pour participer au conflit le plus meurtrier pour la France : toute une classe d'âge est décimée.³⁹ Il a la chance de s'en sortir sain et sauf, revient au laboratoire de la Sorbonne et peut reprendre sa thèse qu'il termine en 1921. Cette thèse d'État peut être considérée comme typique des préoccupations de Le Chatelier. Premièrement, elle porte sur l'oxyde de fer à haute température et ses équilibres avec l'oxyde de carbone gazeux, ce qui réunit états solide et gazeux. Deuxièmement, en reliant un sujet universitaire (réactions en équilibre) à des besoins industriels (fonctionnement des hauts-fourneaux), elle présente une dualité double : fondamental-appliqué et université-industrie. Enfin, elle se situe entre deux corpus disciplinaires : métallurgie et chimie minérale et fait appel à un troisième : la thermodynamique (chimique et physique). Le sujet est porteur, Chaudron est doué, travailleur. Les résultats de cette thèse – en particulier le diagramme d'équilibre des oxydes de fer – sont rapidement utilisés pour améliorer le fonctionnement des hauts-fourneaux et intégrés à l'enseignement universitaire durant les années 1940.⁴⁰

En résumé, Chaudron est formé dans un laboratoire dominant, performant et atypique du système universitaire français. Le Chatelier y mène une politique d'ouverture des frontières entre les disciplines (chimie, métallurgie, thermodynamique), entre l'université et l'industrie, entre la France et l'étranger. Le jeune Chaudron baigne dans cette recherche interdisciplinaire appliquée, tournée vers les instruments physiques et les savoir-faire chimiques et méfiante vis-à-vis des conceptualisations. Sa thèse, qui porte sur l'étude des oxydes de fer, se déroule bien et la Grande Guerre ne vient pas le faucher avec le reste de sa classe d'âge. Il est alors prêt à se lancer dans une carrière universitaire avec les acquis de sa formation et les recommandations de son maître.

II.2.1.2. Les premiers pas du chercheur dans les traces du maître (1921-1928) :

Après sa thèse, Chaudron est d'abord nommé sous-directeur du Laboratoire de chimie minérale du Collège de France. Camille Matignon y occupe la chaire (1908-1934) laissée vacante par la mort de son maître, Marcelin Berthelot [Charle & Telkes, 1988, p. 165-166]. Y trouvant des locaux vétustes et mal équipés pour la recherche, Chaudron se fait embaucher simultanément au Laboratoire de métallurgie de l'École des Mines de Paris comme « chef de travaux ». Dans ce fief de Le Chatelier il retrouve d'anciens condisciples : Portevin, E. Dupuis et Jolibois [Cornet, 1990, p. 4]. À cheval sur deux laboratoires, Chaudron met en pratique l'interdisciplinarité prônée par son maître entre chimie minérale et métallurgie : il lance ses premiers étudiants soit sur les oxydes de fer, soit sur les métaux et alliages. En outre, Jolibois, alors professeur de chimie générale et analytique, devient son ami et lui fait découvrir l'électrochimie. Il finit de le convaincre (après Le Chatelier) de l'importance des méthodes physiques en chimie.⁴¹ Aux Mines encore, au contact de ses anciens condisciples, Chaudron

³⁹ Cette remarque est loin d'être anecdotique dans la mesure où l'espace universitaire s'étant vidé de toute une génération, ceux qui en reviennent ont moins de concurrences et d'oppositions, ce qui rend leur situation plus facile.

⁴⁰ « Je ne savais pas que c'était le Chaudron des diagrammes des oxydes de fer (réduction du minerai dans les hauts fourneaux), celui dont on nous avait parlé en taupé, sinon j'aurais été beaucoup plus impressionnée. » [I Mondange, 2004, p. 2]. « Le diagramme d'équilibre des oxydes de fer paraît aux Comptes Rendus de l'Académie des Sciences le 10 janvier 1921 et rend Georges Chaudron célèbre. » [Cornet, 1990, p. 4].

⁴¹ La primauté de la caractérisation physique en chimie est revendiquée par Jolibois comme l'axe majeur de ses travaux : « Les recherches que j'ai exécutées depuis 1908 dans divers laboratoires procèdent toutes, malgré la variété des sujets traités, d'une même idée directrice : appliquer à la résolution de problèmes chimiques, des

se frotte à un autre domaine : la chimie des hautes températures (II.3). Ainsi, lorsque Chaudron quitte le laboratoire de la Sorbonne, l'ombre du maître continue de planer sur sa carrière comme ange gardien social (poste aux Mines, aide des anciens camarades de laboratoire) et garde-fou méthodologique (variété disciplinaire inculquée par le maître). La venue aux Mines paraît rétrospectivement déterminante (par rapport à la « chimie des hautes températures ») et terriblement contingente (si le laboratoire du Collège de France n'avait pas été vétuste, Chaudron ne serait pas allé aux Mines, etc.). Pourtant, Chaudron a tendance à minimiser l'importance pour sa carrière du passage au laboratoire florissant des Mines. Probablement veut-il convaincre (en vain) qu'après sa période de formation chez Le Chatelier, il s'est fait tout seul ?⁴²

De 1921 à 1928, Chaudron encadre cinq thèses. Leur énoncé [Chaudron, 1954, p. 98] confronté à d'autres sources suggère les remarques suivantes. Trois des thèses portent sur les oxydes et sont publiées dans les *Annales de Chimie* tandis que les deux autres, en lien avec les métaux, sont publiées dans la *Revue de métallurgie* (fondée par Le Chatelier).⁴³ Malgré ces différences disciplinaires, les études sur les oxydes et les métaux présentent des points communs. Elles portent sur des composés solides, en particulier sur leurs transformations structurales ou changements de phase (pour quatre des cinq thèses). Ces modifications de la structure cristalline sont obtenues en chauffant les échantillons dans des fours : les

méthodes empruntant à la Physique expérimentale sa technique et ses instruments. » [Jolibois, 1937, p. 5]. Il serait bien invraisemblable que Jolibois n'ait pas partagé cette idée, leitmotiv de son œuvre scientifique depuis près de quinze ans, avec son compagnon de laboratoire et ami, Chaudron.

⁴² Deux versions contradictoires sont données : [Chaudron, 1954], trente ans après, ne mentionne pas son passage aux Mines alors que [Cornet, 1990, p4] insiste sur cet épisode en considérant comme nul le passage au Collège de France. Une troisième source [Lebeau, 1950, p. XIII] (probablement renseigné par Chaudron !) affirme qu'au moins un des cinq étudiants travaille au Collège de France : Xavier Waché sur la « corrosion de l'aluminium et de ses alliages ». La double appartenance disciplinaire des thèses [Chaudron, 1954, p. 98] ne tranche pas la question puisque Waché mène une thèse de métallurgie au Laboratoire de chimie minérale. Comment interpréter ces déclarations contradictoires ? Trois possibilités au moins sont plausibles : 1) Waché est officiellement déclaré au Collège de France mais travaille aux Mines, l'interprétation de Cornet est valable mais l'oubli de [Chaudron, 1954] inexplicable ; 2) Waché travaille effectivement au Collège de France mais c'est le seul des premiers élèves à y travailler, ce qui rend valable l'explication du départ rapide du Collège de France mais plus improbable encore l'oubli de Chaudron ; 3) Waché n'est pas le seul à travailler au Collège de France, Chaudron ne part pas aux Mines, ce qui explique l'oubli de Chaudron mais pas le récit de Cornet. Le mystère peut être éclairci par la nature de la source [Chaudron, 1954] : c'est une *Notice de ses titres et travaux scientifiques* qu'il rédige pour être élu à l'Académie des Sciences. Or, le but principal d'une telle notice est de montrer la pertinence de sa propre candidature. On peut objecter qu'il a simplement voulu mettre l'accent sur ses travaux de chimie minérale et ses recherches fondamentales en effaçant un laboratoire de métallurgie dans une école d'ingénieurs. Il est tout de même en compétition avec Irène Joliot-Curie, prix Nobel de chimie en 1935, pour ses travaux sur la radioactivité artificielle. Mais cette supposition ne tient pas car il met justement l'accent sur son interdisciplinarité et sur les apports de l'industrie. Plus probablement il cherche à augmenter son mérite propre – il n'est pas le seul à la faire dans ce genre de documents –, ce qui le conduit à faire disparaître l'apport de son passage aux Mines. La seule influence dont il se réclame est son maître, éminent savant. Il oublie Jolibois, son pair, ce qui est d'autant plus troublant que la place à pourvoir est celle de... Jolibois lui-même, qui vient de décéder. À mon avis, la version la plus probable est que Chaudron a travaillé simultanément dans les deux laboratoires mais qu'il a décidé de ne pas mentionner les Mines dans [Chaudron, 1954]. Cette petite étude de cas montre un bel exemple dans un discours scientifique de mise en valeur de l'individu (par lui-même) au détriment des influences « sociales » diverses qu'il a rencontrées dans sa vie puis « oubliées » dans le document officiel.

⁴³ Les énoncés des cinq thèses sont les suivants : pour les oxydes de fer, : « L. Blanc. Etude de quelques transformations observées au cours de la calcination* des sesquioxides de fer, de chrome et d'aluminium. (*Thèse*, Paris, 1926) », « H. Forestier. Transformations magnétiques du sesquioxyde de fer, de ses solutions solides et de ses combinaisons ferromagnétiques (*Thèse*, Paris, 1928) », « J. Hugget. Application de l'analyse thermomagnétique à l'étude des oxydes et des minerais de fer (*Thèse*, Paris, 1928) » ; les deux thèses sur les métaux s'intéressent, l'une « à l'étude des alliages ternaires », l'autre à la « dissolution de l'aluminium et de ses alliages dans les acides. »

températures associées aux oxydes de fer sont de quelques centaines de degrés Celsius (transition à 570°C pour le protoxyde de fer), celles nécessaires pour les métaux atteignent deux mille degrés. Pour ce faire, Chaudron utilise les techniques standard de haute température, couramment employées par les métallurgistes. Il procède lui aussi à l'amélioration de fours avec l'aide des techniciens du laboratoire.⁴⁴ Les conditions sont moins drastiques pour les composés minéraux (températures plus basses et atmosphère oxydante) que pour les métaux (travail sous vide pour éviter l'oxydation et plus haute température). La première des deux thèses sur les métaux trace un diagramme de phase ternaire, ce qui constitue une étude classique de métallurgie.⁴⁵ Les modifications structurales des composés solides sont repérées par la mesure d'un paramètre physique macroscopique qui, à la transition de phase, subit une modification : analyse thermique dilatométrique* (développée par Le Chatelier), propriétés magnétiques (ferromagnétisme* et analyse thermomagnétique*). Depuis 1900, c'est une pratique courante des métallurgistes. Où Chaudron innove, c'est en appliquant ces méthodes classiques de la métallurgie à l'étude des oxydes minéraux. Il parle de « transpositions » de la métallurgie vers la chimie. Il emploie ainsi une même méthode instrumentale pour deux types de solide jusque-là dissociés, les métaux et les minéraux. Il fait de même avec les théories : il applique le concept de « solution solide » – utilisé depuis près de quarante ans par les métallurgistes – à un oxyde et revendique la paternité de cette transposition dans le cas des oxydes de fer. Tout en reconnaissant sa dette envers Le Chatelier, il revendique une certaine priorité en chimie minérale.⁴⁶ Au niveau européen, cette pénétration de la métallurgie dans la chimie est progressive depuis le début du siècle par l'intermédiaire de quelques chimistes proches de la « métallurgie physique » comme Le Chatelier.⁴⁷ La deuxième thèse de métallurgie offre un mouvement contraire. En étudiant une réaction acido-basique impliquant des métaux et des alliages, elle propose une « transposition » dans le sens opposé, de la chimie vers la métallurgie, qui semble originale.⁴⁸

⁴⁴ « Chaudron fait ses premières recherches sur les réfractaires à haute température, grâce à la construction, avec M. Garvin, du premier four sous vide à haute température (2000°C) utilisant un résistor en graphite. » [Cornet, 1990, p. 4]. Par la suite, il continue de travailler avec ce type de fours électriques puisque c'est lui qui rédige l'article sur les « fours à résistance de carbone » dans l'ouvrage collectif, *Les Hautes Températures et leurs utilisations en Chimie*, édité par Lebeau en 1950.

⁴⁵ L'établissement des diagrammes de phase est une des occupations majeures des métallurgistes à partir de entre 1900 et 1940. La théorie des diagrammes ternaires, plus difficile que pour les binaires, est maîtrisée dès 1900 par la communauté de métallurgie physique [Chezeau, 2004, p. 154-156, 174].

⁴⁶ « Je dois certainement à cette formation [avec Le Chatelier] l'idée de certaines transpositions de techniques et de théories d'un domaine à l'autre » puis il affirme « avoir été le premier à utiliser l'analyse thermomagnétique en chimie minérale » « Depuis longtemps les métallographes étaient familiarisés avec les notions de solution solide et de phase à composition variable ; j'ai montré à plusieurs reprises que les propriétés essentielles de ces phases métalliques pouvaient être retrouvées dans certains composés minéraux : par exemple, le protoxyde de fer. » [Chaudron, 1954, p. 7-8].

⁴⁷ Cette pénétration est bien sûr lente, collective et complexe. Pour prendre l'exemple de « solution solide », le concept est d'abord défini par la thermodynamique appliquée aux métaux : pour « la première fois, [en 1890...] le concept de solution solide est défini de façon précise » par Van't Hoff. Il est rapidement accepté au sein de la communauté de « métallurgie physique », en partie grâce à Le Chatelier, lecteur assidu des théoriciens de la chimie-physique. À ce moment-là, il passe en chimie par le truchement des quelques chimistes de cette communauté : Roozeboom (Amsterdam), Tamman (Berlin et Leipzig), Kurnakov (Saint-Petersbourg), Guthrie (Londres) et Le Chatelier (Paris) [Chezeau, 2004, p. 72-73, 140, 147-148]. Une nouvelle fois, Chaudron est probablement plus redevable à son maître qu'il l'affirme.

⁴⁸ Jusqu'en 1914 au moins, les travaux expérimentaux des métallurgistes s'intéressent uniquement à des « transformations » de type « allotropique », c'est-à-dire de changements de phase, et non pas à des réactions chimiques [Chezeau, 2004, p. 149-152]. Chaudron [1954, p. 7] revendique aussi les transpositions de la chimie à l'étude des métaux : « j'ai bien souvent appliqué aux opérations métallurgiques des techniques empruntées à la chimie. »

Dès les années 1920, deux traits forts caractérisent l'ensemble des travaux scientifiques de Chaudron : les transpositions disciplinaires et l'importance cruciale de la synthèse. Les techniques de haute température, en particulier les fours, constituent l'outil crucial à deux niveaux d'abord parce qu'ils permettent la synthèse des composés sous atmosphère plus ou moins contrôlée et ensuite parce qu'ils induisent les changements de phase pour l'étude physique. Techniques – synthèses et réactions chimiques, fours, analyses thermiques dilatométrique et magnétique – et concepts – diagrammes de phase et solutions solides – s'échangent entre les deux disciplines et conduisent à de nouveaux résultats scientifiques. Chaudron participerait-il à un mouvement plus vaste, à l'échelle occidentale, de transpositions des acquis de métallurgie physique vers la chimie minérale ?⁴⁹ Quoiqu'il en soit, Chaudron développe, dès les années 1920, sous l'influence de la métallurgie, une approche « physico-chimique »⁵⁰ du solide minéral puisque ses premiers élèves associent des synthèses chimiques de solides minéraux et métalliques à des caractérisations physiques sur leurs changements de phase. Malgré d'importants croisements méthodologiques, aucun terme générique n'est employé, à ce stade, pour désigner sous une dénomination commune métaux et oxydes sous forme solide. L'approche se fait au cas par cas, pragmatique et efficace.

Les travaux de Chaudron peuvent être comparés à ceux de Urbain, adversaire de Le Chatelier, autre grand maître de la chimie minérale française du début du vingtième siècle [Claro-Gomès, 2003]. Dès ses travaux de thèse (1895-1899), Urbain développe aussi une approche physico-chimique pour étudier certains solides minéraux, les composés des terres rares. Il cherche à les synthétiser, à les isoler et à les définir par leurs propriétés. La difficulté essentielle des terres rares porte sur la similitude de leurs propriétés chimiques, ce qui rend difficile leurs séparations et leur identification. En particulier, elles cristallisent sous forme de composés isomorphes. Pour séparer les terres rares les unes des autres, les chimistes pratiquent deux étapes successives : dissolution non sélective par traitements acido-basiques ou thermiques du minerai pour obtenir un mélange d'ions en solution puis « fractionnement » sélectif par recristallisation en jouant sur les faibles différences de basicité et de solubilité des éléments. Face à ces pratiques classiques, Urbain innove en empruntant de nouvelles techniques à la chimie organique. Il a recours à une « complexation » sélective des éléments par « des réactifs organiques, tels que les acétylacétones ou les éthylsulfates » et améliore le rendement des recristallisations par introduction d'un corps tiers. Cet apport est d'autant plus facile que Urbain fait sa thèse dans un laboratoire de chimie organique, celui de Charles Friedel à l'Institut de chimie appliquée de Paris. Néanmoins, les rendements étant faibles, le nombre de recristallisations est très grand pour chaque séparation. Urbain a semble-t-il effectué plus de « 200 000 recristallisations » au cours de sa carrière.

Une fois les éléments séparés, il s'agit de les identifier, en d'autres termes, de les caractériser. A la fin du dix-neuvième siècle, la caractérisation officielle de l'élément isolé était la mesure de son poids atomique (qui se faisait sous forme d'oxydes dans le cas des terres rares) car c'était la seule caractérisation quantitative. Par ailleurs, les chimistes empruntaient aussi à la physico-chimie des caractérisations spectroscopiques – qualitatives – qui donnent une signature de l'élément car les spectres sont très différents d'une terre rare à l'autre. Urbain à nouveau innove en matière de caractérisation puisqu'il introduit un contrôle

⁴⁹ Ce mouvement est perceptible jusqu'en 1914 dans la communauté internationale développée par [Chezeau, 2004]. Pour la période d'entre-deux-guerres, je n'ai pas trouvé de référence à la chimie dans les ouvrages d'histoire de la physique [Hoddeson & al., 1992] et des matériaux [Cahn, 2001].

⁵⁰ Cette approche physico-chimique chemine de la chimie-physique à la métallurgie physique de (1890-1910) [Chezeau, 2004, p. 166]. Certains épigones de Chaudron lui attribuent cette approche : « Chaudron, plutôt Métallurgie, s'intéressant aux métaux avec une approche de physico-chimiste » [I Vivien, 2004, p.1]. Néanmoins, cette citation concerne le contexte des années 1950. D'après ce qui précède, une certaine approche physico-chimique est pratiquée bien avant, dès les années 1920.

quantitatif supplémentaire par « mesures de la susceptibilité magnétique » (qu'elle soit paramagnétique ou diamagnétique) des terres rares. Cette technique, plus rapide (un quart d'heure au lieu de dix jours pour le poids atomique), plus simple, et la mise au point de la balance magnétique sont rendues possibles grâce à ses amis Pierre et Marie Curie et Paul Langevin, spécialistes du magnétisme.⁵¹

Si l'on compare les travaux de Urbain (1895-1928) à ceux de Chaudron (1913-1928), on trouve peu de pratiques communes (mis à part des caractérisations magnétiques) mais une organisation similaire du travail. Tous deux étudient des composés minéraux (terres rares pour l'un, éléments de transition pour l'autre) en deux étapes : synthèse minutieuse et propre puis caractérisations physiques (spectroscopiques pour Urbain et thermiques pour Chaudron). L'élément chimique est au cœur de leur pratique physico-chimique de la matière mais les caractérisations utilisées sont spécifiques des éléments étudiés. Ainsi, la spectroscopie est bien adaptée pour étudier les spectres de terres rares (très différents d'une terre rare à l'autre) tandis que les études thermiques conviennent à des matériaux réfractaires qui subissent des changements de phase (comme les oxydes de fer par exemple). Les pratiques socio-cognitives s'adaptent aux composés solides étudiés ou vice versa. Ce qui est troublant dans cette convergence vers une semblable physico-chimie des solides, c'est la différence des chemins parcourus à partir de deux points distincts. Partant de préoccupations universitaires et cognitives, Urbain étudie les composés minéraux des terres rares (il passera à leurs métaux durant les années 1930) en utilisant les ressorts de synthèse de la chimie organique et de caractérisation de la physico-chimie. Chaudron part de l'étude des oxydes de fer à l'interface université-industrie puis élargit aux métaux et oxydes des éléments de transition en ayant recours aux transpositions en provenance de la métallurgie. Dans les deux cas pourtant, ce sont deux chimistes minéralistes qui renouvellent leur discipline par des pratiques empruntées à des domaines scientifiques connexes. Cette heuristique par franchissement des frontières disciplinaires est facilitée par deux maîtres de thèse (Friedel et Le Chatelier), eux-mêmes ouverts aux échanges disciplinaires et placés aux interfaces.

II.2.1.3. L'époque lilloise ou l'essor du professeur de province (1928-1939)

En 1928, Chaudron obtient la chaire de « chimie industrielle » de la faculté des sciences de Lille. Pascal vient de la quitter pour celle, plus prestigieuse, de « chimie appliquée » de la Sorbonne, devenue vacante à la mort de Camille Chabré [Charle & Telkes, 1989, p. 73, 214]. Ce jeu de chaires musicales met en évidence l'aller Paris→province des jeunes universitaires parisiens pour devenir professeur et le retour province→Paris des professeurs pour devenir mandarin. Les jeunes loups trentenaires s'éloignent de la Sorbonne pour grimper l'échelle sociale en province parce qu'ils auraient moins de chance à Paris face aux « barbes blanches » [Friedel, 1994]. Chaudron délivre un cours de « chimie appliquée » métissée de thermodynamique et de cinétique chimique à la faculté et se trouve promu directeur de l'Institut de chimie appliquée de Lille (ICL) (1928-1939) [Cornet, 1990, p. 4].⁵²

⁵¹ Toutes les citations sur Urbain proviennent de [Claro-Gomès, 2003]. Dans la conclusion de la thèse, on trouve un résumé : « Urbain est un chimiste inorganicien qui s'est familiarisé avec les techniques employées en chimie organique dès ses débuts au laboratoire de [Charles] Friedel. » Ces techniques sont principalement la « spectroscopie » (qui vient aussi de la physico-chimie) et la « cristallisation » (qui lui permet d'isoler les composés purs).

⁵² L'obtention par Chaudron de deux postes semble une promotion exceptionnelle mais résulte en fait de la dissymétrie Paris-province, mentionnée lors de la description des mandarins de la Sorbonne (I.2.1). La comparaison des nominations en 1928 à la direction des Instituts de chimie de Paris et de Lille montre un même

Entre 1928 et 1939, Chaudron fait soutenir quinze thèses à Lille. Leurs énoncés suggèrent diverses remarques.⁵³ Comme pour la période précédente, il y a équilibre entre chimie minérale et métallurgie (sept de chaque, plus l'étude mécanique d'« une fibre de lin ») avec un intérêt particulier pour l'élément fer. De nouveaux éléments sont préparés sous forme de « métaux purs » (c'est-à-dire exempts de gaz) et étudiés sous forme d'alliages (cuivre, magnésium et calcium, aluminium). Cette tendance locale peut être reliée à une tendance plus globale au sein de la métallurgie française. En effet, l'industrie aéronautique, alors en plein développement, use d'incitations pour développer de nouveaux alliages mécaniques.⁵⁴ Chaudron encourage de nouvelles techniques de préparation afin d'obtenir des taux de pureté plus grands. Ce faisant il transpose des savoir-faire de la chimie minérale vers la synthèse de métaux et alliages métalliques.⁵⁵ Les composés minéraux sont aussi diversifiés : Chaudron oriente trois thèses vers les « phosphates » au cours des années 1930. Pourquoi un tel choix ? Les phosphates solides sont alors peu étudiés par les chimistes français. La seule mention que j'ai trouvée touche l'élément phosphore : la thèse de Jolibois porte sur les phosphures (1908-1909). Par la suite, entre-deux-guerres, Jolibois s'en détourne et se concentre en électrochimie [Jolibois, 1937, p. 5-7]. Après la Deuxième Guerre mondiale, il travaille à nouveau sur les phosphates et en devient le spécialiste français [Boullé, 1959].⁵⁶ Les contacts amicaux entre Jolibois et Chaudron ont donc pu être source d'inspiration (dans les deux sens d'ailleurs). Ce qui est plus intéressant dans le cas des phosphates, c'est la méthode d'étude utilisée. C'est sur ce sujet, que pour la première fois de sa carrière, Chaudron a recours à la diffraction des rayons X pour étudier la structure des solides par la méthode de « Debye-Scherrer ». Il en confie la réalisation à un élève bricoleur, André Michel. L'utilisation des rayons X pour déterminer des structures cristallines est une première pour un laboratoire français de chimie et une première pour la région Nord.⁵⁷ Un renouveau instrumental induit ainsi un changement

déséquilibre en faveur de Paris : un jeune chimiste prometteur tel que Chaudron peut être promu directeur de l'ICL alors que c'est un monstre sacré, Urbain, qui obtient la direction de l'ICP. Le poids de Urbain dans la communauté française est alors impressionnant : mandarin plus influent que Le Chatelier, il est proposé vingt-deux fois par la France au prix Nobel de chimie entre 1912 et 1936 [Claro-Gomès, 2003, chapitre VI.1].

⁵³ Les thésards (type de thèse : état ou ingénieur-docteur, date de soutenance) sont : A. Villachon (état, 1932), E. Herzog (état, 1932), E. Rousseau (état, 1934), J. Antheaume (état, 1934), F. Gambey (état, 1935), R. Mondon (ingénieur-docteur, 1938), A. Girard (ingénieur-docteur, 1935), Jean Herenguel (état, 1936), A. Hache (ingénieur-docteur, 1937), André Michel (état, 1937), L. Moreau (ingénieur-docteur, 1938), H. Herlemont (état, 1940), B. Mikolas (état, 1940), J. Delabre (état, 1941), Mille V. Bossuyt (état, 1941) [Chaudron, 1954, p. 98-99].

⁵⁴ Ainsi, au laboratoire de l'École centrale dirigé par Portevin (ancien camarade de laboratoire de Chaudron chez Le Chatelier), la thèse de Bastien soutenue en 1933 porte sur l'« Étude des alliages magnésium-aluminium-cuivre riches en magnésium ». Elle est financée par les « Services de recherches du Ministère de l'Air » avec pour objectif le remplacement de l'aluminium par le magnésium moins dense dans les alliages [Lacombe, 1984]. Le sujet et le financement sont les mêmes pour la thèse de René Pâris au Laboratoire de Mondain-Monval (VI.1.1.2).

⁵⁵ Les synthèses sont plus variées : « dégazage », « sublimation », « distillation »... Il semble que le recours aux « méthodes de distillation et de sublimation » soit une transposition de la chimie minérale vers la métallurgie [Chaudron, 1954, p. 7] : « par les méthodes de distillation et de sublimation, j'ai pu préparer, à l'échelle semi-industrielle, du magnésium et du calcium très purs. »

⁵⁶ Si en quelques années à peine (1945-1948) Jolibois devient la référence française des phosphates comme le suggère son biographe, ceci confirme la relative absence d'études universitaires sur le sujet entre-deux-guerres.

⁵⁷ « J'ai notamment appliqué [...] la méthode de Debye-Scherrer en rayonnement monochromatique. Cette technique m'a été particulièrement précieuse dans l'étude d'un sujet difficile, celui des phosphates de calcium. » [Chaudron, 1954, p. 7]. « [En 1932], le Professeur G. Chaudron accueille [Michel] dans son laboratoire et lui confie le montage et la mise au point d'une installation de diffraction X, la première dans son laboratoire et la première dans la région du Nord. » [Cornet, 1990, p. 11]. « Le jeune thésard, manipulateur doué et « bricoleur » de qualité se voit confier la réalisation et le montage de nouveaux appareils de caractérisation dont la mise au point d'une installation de diffraction X sur poudres » [Bernier, 2007, p. 1].

de paradigme : « l'élément chimique » qui régnait sur la chimie française depuis le début du siècle [Claro-Gomès, 2003] est remplacé par la « structure », ici cristalline.

D'autre part, au niveau sémantique, deux glissements majeurs se produisent. Les composés solides ne sont plus uniquement définis par leur constitution chimique : ainsi l'énoncé des thèses parle moins d'oxydes de fer et plus de réfractaires, de catalyseurs. Doit-on rapprocher cette tendance d'une inflexion des recherches vers les applications ? En effet, Chaudron, profitant de la direction d'une école d'ingénieurs, embauche des ingénieurs pour faire des thèses d'ingénieurs (quatre sur quinze), qui sont en partie financées par les industriels du Nord, intéressés par les applications.⁵⁸ La deuxième évolution tend à expliciter dès l'énoncé de la thèse les propriétés physiques qui sont étudiées : conductivité électrique, magnétisme, dilatométrie...⁵⁹

En résumé, Chaudron profite de la période lilloise pour mettre en terre les semis interdisciplinaires entre métallurgie et chimie minérale. Il concrétise ainsi avec de nombreux élèves les transpositions physico-chimiques évoquées depuis la fin de sa thèse. C'est probablement l'introduction de la diffraction des rayons X par la méthode de Debye-Scherrer qui marque la plus grande innovation technique des années trente en *Chaudronnerie*. D'un programme de recherche centré sur l'élément, on passe alors à une focalisation sur la structure cristalline des solides que ce soit des phosphates, des métaux ou des oxydes. Mais c'est aussi le moment où le professeur montre ses talents pour nouer des liens avec les industriels du Nord et les pouvoirs publics. En temps de vaches maigres, après le krach boursier de 1929, il parvient à se faire construire « un magnifique laboratoire de recherche ». ⁶⁰ Ce faisant, il préfigure les « scientifiques entrepreneurs » d'après-guerre [Jacq & Pestre, 1996, p. 269].

II.2.1.4. De l'Occupation à l'après-guerre, une montée en puissance du mandarin (1939-1950)

Au cours des années trente, Urbain développe des contacts avec les industriels français des terres rares, qui commercialisent certains des éléments comme « pierres à briquet » ou « additifs » dans les verres ou les porcelaines.⁶¹ La séparation et la purification des terres rares en particulier leur posent problème. Après s'être consacré à des recherches fondamentales, Urbain a l'idée de se lancer dans le traitement semi-industriel des terres rares. Grâce à ses soutiens institutionnels, il fonde en 1937 le « Laboratoire des gros traitements chimiques » afin de « mettre au point la préparation et la purification de certains métaux des Terres Rares à l'échelle quasi-industrielle ». ⁶² De santé fragile, Urbain meurt en 1938. La

⁵⁸ « Inspiré par les idées de son maître [Le Chatelier] sur la nécessaire collaboration entre la science et l'industrie Georges Chaudron trouva dans les milieux industriels du Nord certains interlocuteurs convaincus de la justesse de ses idées. » [Bénard, 1980].

⁵⁹ 8 titres sur 15 mentionnent les propriétés physiques des composés : « réfractaires » (2), anti-corrosion (2), « catalyseur » (1), « conductivité électrique » (1), magnétisme (1), dilatation volumique (1), « mécanique » (1) [Chaudron, 1954, p. 98-99].

⁶⁰ « Grâce aux appuis qu'il avait su se constituer, [Chaudron] réussit cependant à surmonter ces difficultés et nous vîmes bientôt s'édifier un magnifique laboratoire de recherche à proximité de l'ancien Institut de Chimie. » [Bénard, 1980].

⁶¹ « il existait en France une industrie des terres rares depuis le début du siècle pour la fabrication de pierres à briquet et d'additifs pour le verre afin d'obtenir de meilleurs indices de réfraction. On les utilisait aussi - et on les utilise toujours - comme colorants pour la porcelaine. » [I Caro, 2002, p. 7].

⁶² Cette version est grosso modo confirmée par [RA CNRS, 1952] : « Le laboratoire Central des Traitements Chimiques avait été créé par Georges Urbain en 1938 dans le but de disposer d'installations semi-industrielles pour la préparation de certains éléments nécessitant le traitement de quantités assez considérables de matières

direction de ce laboratoire est alors vacante. Chaudron désireux de revenir à Paris y postule dès 1938. En concurrence à cette succession avec un professeur de chimie organique, Henry Gault, Chaudron bénéficie d'un soutien sans doute déterminant, celui de Lebeau [Cornet, 1990, p. 1-3]. La parenté des recherches de Chaudron avec celles de Urbain (II.2.1.2) a aussi pu un poids déterminant : la différence élémentaire (terres rares contre éléments de transition) s'est avéré moins déterminante qu'une convergence autour de l'état solide. Après de longs mois de tractation, Chaudron est officiellement nommé directeur, début 1939, du « Laboratoire central des traitements chimiques » (LCTC), qui est le premier laboratoire rattaché au CNRS après sa création. La suppression de l'adjectif « gros » marque l'abandon du projet semi-industriel et la réorientation vers des échelles plus réduites tandis que la conservation de l'expression « traitements chimiques » conserve l'orientation principale synthèse-purification de composés chimiques. Simultanément Chaudron est promu « professeur sans chaire » à la Sorbonne et « chargé de conférences » à l'École Normale Supérieure de Sèvres. Sous Vichy, il assure en outre, à la Sorbonne, les cours d'analyse et de mesures chimiques en remplacement de la titulaire de la chaire, Mme Ramart-Lucas, mise à l'écart après la mise en place des nouvelles lois discriminatoires du régime.⁶³

De l'Occupation à la IV^e République, la *Chaudronnerie* continue sa progression thématique sans rupture entre la poursuite de thèmes préexistants et le développement de nouvelles pratiques de laboratoire. Durant la période 1939-1950, Chaudron encadre onze thèses et trois DES, ce qui marque une production à peu près constante par rapport à la période lilloise (15 thèses en 13 ans).⁶⁴ La guerre n'a donc pas complètement désorganisé la recherche française, même si les étudiants ont parfois dû interrompre leurs recherches. La stagnation de la fréquence des travaux suggère plutôt un manque à gagner : le rythme des travaux aurait dû augmenter en même temps que la notoriété et la puissance institutionnelle de Chaudron alors qu'il reste constant. Faisons un rapide tour d'horizon de ce qui est conservé (par rapport aux périodes précédentes) et ce qui est nouveau.

Pour ce qui est conservé. L'énoncé des thèses montre que l'équilibre entre métallurgie et chimie minérale demeure : huit travaux sur les métaux et alliages (fer (3), aluminium (5), palladium-or, zinc) et six pour les oxydes métalliques (de fer (2), de plomb (2), autres (2)). En présentant ses travaux, Chaudron revendique une position entre les deux disciplines. C'est aussi selon cette dualité que ses pairs perçoivent son œuvre scientifique.⁶⁵ Dans un souci de classification, Lebeau [1950, p. XIV] distingue quatre « principaux chapitres » : 1) « étude physico-chimique des oxydes de fer » et des « ferrites » (études thermiques, dilatométriques, thermomagnétiques) sans interaction directe avec les physiciens de Grenoble (I.3.2), même si

premières ; Georges Urbain envisageait en particulier le cas des terres rares [...]. Après sa mort les recherches [...] ont été suspendues à Vitry. »

⁶³ Deux explications ont été proposées ailleurs : 1) raison politique pour [Cornet, 1990, p. 4] : « Ultérieurement, la Chaire d'Analyse et de Mesures Chimiques [échoit à Chaudron] après un mouvement de Professeurs dû au départ de Madame Ramart-Lucas, écartée par le Gouvernement de Vichy pour des raisons probablement politiques », 2) loi sexiste pour [Ramunni, 2000, p. 60-70]. On peut penser que la deuxième source (document écrit par un historien, dix ans plus tard, sans conditionnel) tranche la question. Chaudron, en tout cas, est un homme, de droite, catholique, trois bonnes raisons pour ne pas subir ces lois iniques.

⁶⁴ Les thésards et étudiants soutenant leurs travaux entre 1939 et 1950 sont les suivants : Jacques Bénard (état, 1939), R. Reiller (état, 1943), René Faivre (état, 1944), Paul Lacombe (état, 1944), G. Lucas (ingénieur-docteur 1944), Jean Talbot (DES, 1945), Philippe Albert (DES, 1947), Mme Cholet-Coquelle (état, 1947), P. Morize (état, 1947), Th. Katz (état, 1949), L. Beaujard (état, 1949), H. Chossat (ingénieur-docteur 1949), F. Farhan (ingénieur-docteur, 1950), M. Siramy (DES, 1950, à Toulouse) [Chaudron, 1954, p. 99-100].

⁶⁵ « Les travaux que j'ai publiés se rapportent presque tous à la chimie minérale et à la métallurgie. J'ai été initié aux méthodes de ces deux disciplines dans le laboratoire d'Henry Le Chatelier, où j'ai préparé ma thèse de doctorat. » [Chaudron, 1954, p. 7]. « les principaux chapitres [des travaux de Chaudron], qui, tous, ont trait à la Chimie minérale et à la Métallurgie. » [Lebeau, 1950, p. XIV].

Forestier est un élève de Chaudron (II.2.1.2)⁶⁶ ; 2) « préparation des métaux purs » (calcium, magnésium, aluminium), en particulier leur purification ; 3) « recherches sur la corrosion des métaux et alliages » (passivité, attaque par l'eau de mer) ; 4) « recherches sur les super-réfractaires » en lien avec l'industrie nucléaire (II.3). La classification proposée est intéressante dans la mesure où elle retranscrit le point de vue d'un chimiste contemporain, mandarin de son État. Elle utilise comme critère tantôt la composition chimique pour (1) et (2), tantôt les phénomènes chimiques pour (3) (oxydation), tantôt des expressions liées aux applications pour (3) (corrosion) et (4) (réfractaires). Lebeau a donc recours aux mots en usage à l'époque sans présenter de logique globale, ce qui est conforme aux habitudes des chimistes (II.1.4). La chimie minérale et la métallurgie sont pleinement vécues comme deux disciplines séparées et par conséquent, le métal et l'oxyde métallique ne sont pas conçus comme un unique objet.

Trois nouveautés peuvent être signalées. Premièrement, Chaudron opère un glissement vers la chimie de l'aluminium et vers les défauts. Dans (1), l'étude de la « décomposition » des « oxydes de fer » vient remplacer celle de leur « transformation », ce qui suggère le passage d'un phénomène thermodynamique (courant en métallurgie) à un phénomène chimique⁶⁷ : le solide ne subit plus une transition thermodynamique mais une réaction chimique. Dans (2), les « impuretés gazeuses » ont elles aussi changé de statut : avant-guerre, il s'agissait uniquement de s'en débarrasser (les « purifier ») alors que désormais, l'énoncé des thèses spécifie les questions de leur « dosage » et de leur « rôle ».⁶⁸ L'étude des défauts (gazeux ou dus à un « bombardement ionique ») prend une importance générale en lien avec les industries navale et nucléaire.⁶⁹ Dans (2) encore, la prédominance du fer (dix des trente quatre premières thèses) recule devant la montée de l'aluminium. La purification en particulier occupe la moitié des thèses sur l'aluminium (quatre sur huit). Pour la première fois dans l'énoncé des thèses apparaît l'expression « cristal unique », ce qui indique un effort en cristallogénèse de l'aluminium.⁷⁰ Deuxièmement, un nouveau « chapitre » est ouvert à partir

⁶⁶ Un chimiste métallurgiste comme Chaudron s'intéresse au même moment, aux mêmes composés solides que le Laboratoire Néel (« oxydes de fer » et « ferrites »), mais pas avec les mêmes objectifs. Néel et Bertaut cherchent à confronter les résultats du modèle du ferrimagnétisme à des solides réels [Pestre, 1990] tandis que Chaudron insiste sur la partie synthèse, la « préparation » des solides eux-mêmes. Si à un même mot – « ferrites » – (nom d'une famille de composés) sont associées deux visées méthodologiques différentes, n'est-ce pas un indice qui suggère qu'il y a bel et bien deux objets d'études et deux communautés distinctes ? Malgré cette rupture communautaire, Chaudron souligne l'importance de ses travaux de synthèse (avant 1950) vis-à-vis de l'engouement que suscitent les « ferrites » dans la communauté scientifique autour de 1954 même s'il ne cite pas expressément les physiciens : « mes recherches sur les oxydes de fer [...] m'ont amené à la méthode générale de préparation des ferrites et actuellement [1954] cette famille de corps présente un grand intérêt » [Chaudron, 1954, p. 7].

⁶⁷ En effet, pour (1921-1928), deux énoncés de thèse mentionnent les « transformations » du protoxyde de fer. La thèse de Bénard (1939), en revanche, étudie la « décomposition du protoxyde de fer » [Chaudron, 1954, p. 98-100]. Le terme « décomposition » indique une réaction chimique qui, à partir d'un composé unique, produit plusieurs composés. Une « transformation » au contraire désigne le changement d'un réactif initial unique en un produit final unique, caractéristique des transformations physiques. Ce glissement sémantique annonce l'émergence de l'étude des réactions chimiques dans les solides (II.4).

⁶⁸ On trouve dans [Chaudron, 1954, p. 99-100] les formulations suivantes : « Dosage et rôle des impuretés gazeuses », « extraction complète à froid des gaz contenus dans les métaux par bombardement ionique », « Contribution à l'étude des méthodes de dosage des traces d'impuretés dans l'aluminium de haute pureté »

⁶⁹ Sur ces deux thèmes, le LCTC partage les préoccupations de la communauté de métallurgie, il est particulièrement en concurrence avec le Laboratoire de métallurgie de l'Ecole Centrale, dirigé par Bastien, qui étudie ces deux domaines. Le « bombardement ionique » intéresse tout spécialement le CEA dont Bastien (depuis 1949) et Chaudron (depuis 1950) sont « ingénieur-conseil » (I.3.2).

⁷⁰ La thèse de Beaujard (1949) en particulier essaie de « Nouvelles méthodes de préparation des cristaux uniques d'aluminium et leurs applications à l'étude microscopique et cristallographique de l'état métallique. » Cet énoncé suggère que le thésard a synthétisé des monocristaux d'aluminium (appelés « cristaux uniques ») grâce à

de 1945 en *Chaudronnerie* : l'étude des surfaces (deux thèses présentées en 1947). Partant d'un problème métallurgique (l'oxydation des métaux), les deux thèses s'intéressent à la caractérisation de couches d'oxydes métalliques par micrographie*. Ce nouveau chapitre vient ainsi se placer à l'interface entre les métaux et les oxydes. Troisièmement, la diffraction des rayons X, qui était réservée aux phosphates à Lille, est popularisée à Vitry pour déterminer la structure cristalline de tous les solides.⁷¹ Alors que les oxydes métalliques se présentent toujours sous forme de poudres (polycristalline), les alliages sont soit monocristallins (« cristaux uniques » d'aluminium), soit polycristallins suivant les composés.

Ainsi, après-guerre, l'influence institutionnelle de Chaudron continue de croître régulièrement pour atteindre une taille mandarinale. Après une ascension professionnelle régulière, Chaudron obtient la chaire de « chimie appliquée » de la Sorbonne en 1949 [Chaudron, 1954]. Le Laboratoire central des traitements chimiques est probablement l'un des plus riches du CNRS (LCTC), bien équipé, avec une vingtaine de chercheurs.⁷² Chaudron co-préside la « section chimie-physique et minérale » en 1946 [Picard, 1990, p. 106], est élu au Comité national en 1949, dans la section de « chimie minérale » [CNRS, 1949a]. Il occupe aussi diverses positions en vue dans les sociétés savantes nationales : président de la Société française de minéralogie, en 1949 [Lebeau, 1950, p. XIV], puis de la Société française de métallurgie, l'année suivante. C'est en 1950 qu'il est nommé directeur de la plus prestigieuse école française de chimie : l'École nationale supérieure de chimie de Paris (ENSCP) à la suite de Hackspill. Son influence ne s'arrête pas aux frontières nationales puisqu'il est membre de plusieurs institutions étrangères : « docteur honoris causa » de la faculté des sciences de l'université de Bruxelles (1946), « membre correspondant de la Société Royale des Sciences de l'Université de Liège » (1947), « membre de l'Académie Royale de Göteborg (Suède) » (1948), « médaille d'Or Luigi Losana de la Société Italienne de Métallurgie » (1950). Devenu mandarin de l'université française, Chaudron est aussi reconnu au niveau international.

II.2.2. Quelques constantes épistémologiques, sociales et culturelles en Chaudronnerie

Le récit précédent a reconstruit le cheminement historique de Chaudron au cours de sa carrière universitaire (II.2.1). Je voudrais tenter ici une synthèse plus sociologique afin de cerner quelques caractéristiques générales de l'empire scientifique qu'il a construit. Il me semble que l'un des moteurs essentiels de la *Chaudronnerie* se situe dans une habile gestion des instruments, qui permettent au chimiste non seulement de fabriquer de nouveaux solides mais aussi de les caractériser (II.2.2.1). Cette instrumentation ne peut se développer qu'à un endroit propice : le laboratoire, qui apparaît comme le cœur géographique et le centre névralgique de l'empire (II.2.2.2). Enfin, un empire ne serait rien sans les hommes et les

différentes méthodes nouvelles. Cet effort de cristallogénèse pour l'aluminium n'a aucune finalité commune avec l'industrie électronique (CNET dans I.3).

⁷¹ Cette popularisation de la technique au sein du LCTC, pour les années 1940, est confirmée dans [Chaudron, 1954, p. 9] : « La méthode des rayons X a été souvent employée dans toutes mes recherches [...] au cours des quinze dernières années [il écrit en 1954]. »

⁷² Autour de 1950, le LCTC est l'un des plus importants laboratoires du CNRS – probablement le premier si l'on prend séparément chaque laboratoire de Bellevue –. Quelques chiffres permettent de le situer en 1949 : 17 chercheurs (contre 1650 pour l'ensemble du CNRS soit près de 1% du total), un budget annuel de 7,6 millions de francs (soit 160 mille euros 2006), dont 3,8 pour le matériel (soit 3,2% des 117 millions des « crédits 'matériel' des Laboratoires du CNRS »). Pour comparaison, le LEPM compte 6 chercheurs pour un budget de 4,5MF dont 3MF de matériel [CNRS, 1949a ; RA CNRS, 1953].

femmes qui le construisent, le protègent et l'étendent. C'est à travers eux que s'engage une rapide réflexion sur la famille scientifique (II.2.2.3).

II.2.2.1. Une représentation expérimentale et interdisciplinaire des solides

À la Sorbonne, Le Chatelier initie Chaudron à la rencontre de mondes multiples. Chaudron se forme entre chimie et physique, entre chimie minérale et métallurgie, entre solides et gaz, entre université et industrie, entre recherches fondamentales et applications. À leur conjonction, le solide est le grand absent parce que, au laboratoire de Le Chatelier, il n'y pas de place pour les entités abstraites. En revanche, il ne manque ni de composés solides à fabriquer (oxydes de fer), ni de mesures à effectuer (équilibres chimiques en phase gazeuse), ni de bilans à établir (tracé de diagrammes de phases). La *Chaudronnerie* s'établit ainsi au confluent de composés minéraux et métalliques. Une idée simple, chère aux métallurgistes du début du siècle, assure la cohésion de l'ensemble : faire varier la « composition » massique des solides pour mesurer la variation macroscopique de leurs « propriétés physico-chimiques ». ⁷³ La division entre minéral et métal compte moins que la méthode expérimentale. Celle-ci franchit sans complexe les frontières disciplinaires – qui ne sont pas pour autant remises en question –. Si la méthode autrefois appliquée au métal est efficace pour un oxyde métallique, il faut y recourir et vice versa.

Une telle conception, présente en filigrane dès la formation universitaire de Chaudron, contient trois idées force qui marquent la *Chaudronnerie*. Premièrement, la chimie est une science expérimentale. Il y a donc primat de l'expérience sur la théorie. La théorie est dénigrée, jugée peu intéressante voire fautive. Chaudron gardera cette idée en tête tout au long de sa carrière et l'inculquera à ses élèves. La deuxième caractéristique découle du primat de l'expérience : une foi totale dans l'instrument. L'instrument assure une caution suffisante à la science : il suffit que l'expérience soit bien faite et reproductible pour que le résultat soit recevable. ⁷⁴ Par le truchement de l'expérience, l'instrument constitue donc le garant de l'activité scientifique et en assure la valeur. Ce double impératif – expérimental et instrumental – a profondément marqué la *Chaudronnerie* en tant qu'« école de pensée ». Chaudron l'inculque à ses élèves, qui à leur tour l'apprennent aux leurs. En 1980, quatre ans après le décès de Chaudron, soixante ans après la thèse à la Sorbonne, Jacques Oudar, l'élève de l'élève de Chaudron, ne dit pas autre chose lors de la remise de l'épée d'académicien à son maître, Bénard :

« Cette diversité des thèmes de recherche qui conférait à chacun de vos collaborateurs sa propre spécificité lui permettait de ne pas partir les mains vides lorsqu'il était appelé lui-même à fonder sa propre équipe. [...] À son départ il laissait en retour au laboratoire, l'acquis d'une nouvelle technique [...] Cette

⁷³ « dorénavant, ce chapitre [la chimie des oxydes de fer] comporte de nombreuses familles de corps dont la composition et les propriétés peuvent varier d'une manière presque continue » [Chaudron, 1954, p. 9]

⁷⁴ « Chaudron était avant tout un homme de paillasse, la chimie théorique n'était pas son affaire, il voulait que les expériences soient reproductibles mais ne s'intéressait pas à la théorie. [...] il trouvait les théories peu intéressantes, fumeuses même, il n'aimait pas trop les calculs. En revanche, les manipulations, les expériences, les instruments, il aimait beaucoup » [I Mondange, 2004, p. 5]. « Chaudron [...] a exprimé, encore à cette occasion, la méfiance qu'il réservait à toute théorie. » [Cornet, 1990, p. 8].

tradition qui forge au fil des ans la personnalité d'un laboratoire et permet d'assurer le renouvellement des thèmes de recherche sans renier l'appartenance à une école de pensée, vous l'avez vous-mêmes hérité de votre maître, le regretté professeur Chaudron. Vous partagiez également avec lui le goût de l'expérience bien faite dont les conclusions se suffisent à elle-même et une allergie difficilement contrôlable à l'égard de ceux qui prétendent résoudre avec une seule équation un problème à plusieurs inconnues » [Bénard, 1980].

La troisième spécificité méthodologique de la *Chaudronnerie* n'est pas moins profondément ancrée que les deux précédentes. Il s'agit d'un recours aussi systématique que possible à des « transpositions » disciplinaires. Chaudron tient tellement à cette idée qu'il a fait imprimer sur les chemises du Laboratoire (LCTC) cette maxime de l'astronome américain Walter Adams : « Dans un établissement de recherches, tout progrès dans un certain domaine doit être appliqué aussitôt dans les divers champs auxquels l'établissement s'intéresse. » [I Mondange, 2004, p.3]. Souci du quotidien certes mais aussi souci face à la postérité : pour entrer à l'Institut en 1954, Chaudron souligne la place centrale qu'ont occupé les transpositions dans son œuvre scientifique. Aller retour incessant d'une sous-discipline à une autre : chimie minérale et métallurgie surtout, mais aussi thermodynamique, électrochimie ou radiochimie (II.2.1), voire chimie organique (VI.1.1.1). La préoccupation de Chaudron n'est pas dogmatique ni systématique mais pratique : si une méthode instrumentale ou une théorie testées dans un autre domaine est efficace, c'est-à-dire produit quelque chose d'intéressant, alors on poursuit la transposition. Aussi, les échanges s'opèrent à tous les niveaux : synthèse (substitution, traitements thermiques, hautes températures, adaptation des fours) ; mesures physiques (analyses thermique, dilatométrique et magnétique) ; concepts (diagrammes de phase et solutions solides).⁷⁵ L'interpénétration entre chimie minérale et métallurgie en particulier est si profonde qu'elle pose une question brûlante : est-ce une démarche multi-, inter- ou transdisciplinaire ?

La dynamique qui s'engage n'est pas transdisciplinaire : à aucun moment, Chaudron ne prétend transcender les frontières entre métallurgie et chimie et se réclame toujours des deux disciplines. Est-elle pour autant multidisciplinaire ? Chaudron et les siens n'ont pas le sentiment de travailler sur « un objet [...] commun » [Morin, 1997], qui serait le solide, puisque, fidèles à une démarche pragmatique, ils travaillent tantôt sur des métaux, tantôt sur des oxydes métalliques. Une approche multidisciplinaire impliquerait la migration de l'objet d'étude à travers les frontières disciplinaires. Or, dans l'esprit du maître, les objets d'étude – métaux et oxydes – restent dans leurs disciplines respectives – métallurgie et chimie minérale – et ce sont les méthodes et les instruments qui migrent et qui s'appliquent sur des objets différents. La démarche n'est pas non plus multidisciplinaire. Que la *Chaudronnerie* connaisse un succès à long terme (II.2.3.) suggère que sa méthodologie s'apparente à un

⁷⁵ « Je dois certainement à cette formation l'idée de certaines transpositions techniques et de théories d'un domaine à l'autre. C'est ainsi que j'ai appliqué les procédés de l'analyse thermique créés pour les métaux, à mes recherches sur les oxydes de fer. [...] j'ai montré à plusieurs reprises que les propriétés essentielles de ces phases métalliques pouvaient être retrouvées dans certains composés minéraux [...] D'autre part, j'ai bien souvent appliqué aux opérations métallurgiques des techniques empruntées à la chimie ; par les méthodes de distillation et de sublimation » [Chaudron, 1954, p. 7].

« programme de recherche progressif » [Lakatos, 1978]. Les transpositions disciplinaires procèdent donc d'une heuristique performante : elles sont créatrices de résultats scientifiques acceptés et reconnus entre chimie et métallurgie. Partant de deux « matrices disciplinaires » [Kuhn, 1970] distinctes, la *Chaudronnerie* parvient à créer une connaissance en appliquant une partie de l'une (solution solide) à une partie de l'autre (oxyde métallique). De quel côté de la frontière se situent la démarche et le résultat ? Ni d'un côté, ni de l'autre mais sur l'interface, dans la frontière. Pour reprendre l'expression d'Abbot [1995], il ne s'agit pas de la frontière des choses (« *boundaries of things* ») mais des choses de la frontière (« *things of boundaries* »). La frontière n'est pas un ligne de démarcation mais un espace de création. Ainsi, en *Chaudronnerie*, l'un des ingrédients du succès est la transposition interdisciplinaire.

S'il est clair que, en *Chaudronnerie* comme ailleurs en chimie (II.1.1), le solide n'est pas pensé comme un objet (idéal et matériel) unifié vers 1950, une innovation technique majeure va en modifier la représentation. La micrographie avait permis l'observation (micrométrique) des surfaces. Les analyses macroscopiques rendaient compte croyaient-on déjà d'arrangements atomiques. Mais c'est la popularisation de la diffraction des rayons X (II.2.1.4) qui va bouleverser la donne. En rendant possible l'analyse structurales des solides (métaux ou oxydes), elle change le regard en *Chaudronnerie*. Les solides, qui étaient macroscopiques pour le chimiste, se mettent à révéler leurs secrets intimes, en particulier leur organisation atomique tridimensionnelle, à l'échelle nanométrique. Ils deviennent des solides mono- ou polycristallins. Subséquemment, les cristaux apparaissent comme des corps aux multiples qualités : du volume à la surface, du macroscopique au microscopique, de l'élément à la structure, de la propriété à l'application. Chaque nouvelle technique instrumentale pare les solides d'une nouvelle robe épistémologique. Aux yeux de Chaudron, la plus désirable de ces parures est et restera la pureté. Parce que la pureté répond à une satisfaction culturelle des chimistes d'entre-deux-guerres d'atteindre l'élément.

En résumé, la *Chaudronnerie* développe trois constantes au cours de son histoire : primat de l'expérience (en particulier la synthèse), prépondérance des instruments physiques et transpositions interdisciplinaires. Ce sont les instruments qui conditionnent la représentation que l'on a des solides : à la pureté élémentaire – qui semble inaliénable au chimiste – et aux propriétés physiques – empruntés à la métallurgie – est venue s'ajouter une nouvelle vision : la structure cristalline.

II.2.2.2. Du bon fonctionnement d'un laboratoire : structures internes et ouvertures frontalières

Le Laboratoire central des traitements chimiques (renommé Centre d'études de chimie métallurgique en 1953) constitue le centre de la *Chaudronnerie* au moins jusqu'à la retraite officielle de son premier directeur en 1962. Chaudron a su organiser son laboratoire et répartir techniciens, chercheurs et thésards en « Services ». Chaque service se construit autour d'un double impératif : la personnalité d'un ancien élève du maître et un thème de recherche spécifique, porteur et imbriqué à l'ensemble de la *Chaudronnerie*. Vers 1950, la répartition des services est la suivante [Cornet, 1990, p. 8-9] :

1. « métallographie des alliages légers et de l'étude des états de surface métalliques » dirigé par Hérenguel (1940-1945) ;
2. « chimie minérale », dirigé par Bénard (1942-1949) et dédié à l'étude des oxydes métalliques, en particulier de fer, et des applications réfractaires ;

3. « applications des rayons X » dirigé par Faivre (1942-1950), concentré sur les phosphates et les carbonates ;
4. « métallographie et des gros cristaux métalliques » dirigé par Lacombe (1942-1951), qui s'occupe de préparation des métaux purs et probablement de l'étude des gaz dans les métaux ;
5. après le départ de Herenguel en 1945, un nouveau service est créé pour les recherches électrochimiques (sur l'anti-corrosion) et les traitements de surface.⁷⁶

En outre, le laboratoire dispose d'un « atelier » auquel tous les services ont recouru. Les techniciens qui y travaillent ont une place prépondérante – en terme de technique – puisque d'eux dépend le fonctionnement des instruments de mesure, la synthèse des cristaux et le matériel de laboratoire. Le souffleur de verre, par exemple, répare en permanence la verrerie, ce qui est stratégique, à une époque de pénurie (1939-1948) mais aussi lorsque les budgets des laboratoires ne sont pas très élevés. Le photographe prend les clichés de cristaux au microscope optique métallographique. Les techniciens et le personnel administratif sont donc impliqués au quotidien dans le fonctionnement du laboratoire et collaborent en permanence avec les thésards et les chercheurs.⁷⁷

La structure statique d'un laboratoire ne suffit pas : il faut en permanence recruter de nouveaux membres, pour remplacer les départs à la retraite, ou pour croître. Grâce à son entretient à l'Université, Chaudron parvient à recruter facilement le personnel technique du LCTC.⁷⁸ Il doit ensuite recruter des chercheurs et, pour ce faire, attirer des étudiants en thèse. Chaudron utilise ses diverses positions universitaires et son aura de professeur. Quoique parfois brouillons et hachés – ils sont « plein de silences » –, ses cours intéressent les étudiants parce qu'ils présentent « la science en train de se faire », des résultats et questions de recherche récente y sont abordés. Introduire des incertitudes parmi les dogmes académiques est une attitude originale à l'époque. Cette remise en question va de pair avec une approche structurée autour de la thermodynamique et de la cinétique.⁷⁹ Ainsi, grâce à une prestation

⁷⁶ Une autre classification est aussi possible (I Mondange, 2004, p5), plus tardive, après 1950 probablement, puisque Mondange, qui décrit la situation, entre au LCTC en 1948 et n'y reste que par intermittence jusqu'en 1950 : « Il y avait trois ou quatre équipes, on disait « services », qui travaillaient sur des thèmes différents. [...] Albert dirigeait le service de purification des métaux, Talbot étudiait la diffusion de l'hydrogène dans le palladium, il y avait aussi une équipe de chimie minérale, dirigée par M. Faivre, qui travaillait sur les phosphates et les carbonates... »

⁷⁷ « Nous avons également un atelier dont les ouvriers étaient étroitement associés aux chercheurs (il y avait parmi eux un souffleur de verre). » [p. 2] « le père Bossuet » [ancien camarade de Chaudron...] exécutait les photographies. » [I Mondange, 2004, p. 3]. « Un atelier bien outillé, où travaillent plusieurs ouvriers qualifiés, permet d'exécuter les appareils imaginés par les chercheurs. Les chercheurs sont du reste aidés dans leurs travaux par des techniciens, en particulier par deux photographes et deux souffleurs de verre. » [CECM, 1954].

⁷⁸ Pour l'année 1947-48, Chaudron obtient deux nouveaux salaires du CNRS pour une aide technique et un ingénieur [CNRS, 1949a].

⁷⁹ « Chaudron donne un enseignement s'appuyant davantage sur les résultats expérimentaux que sur des théories, remettant en question beaucoup de problèmes apparemment résolus, incitant ainsi son auditoire à se lancer dans la recherche. » et « Son enseignement de la chimie s'appuie beaucoup sur la thermodynamique et la cinétique chimique. » [Cornet, 1990, p. 4]. « A Nancy [ENSIC], les cours que j'avais reçus me paraissaient faits de certitude, la science sûre telle qu'elle a été faite. Au contraire, le cours de Chaudron portait plutôt sur la science en train de se faire, il était plein de points d'interrogation. Quand il disait un mot, ça lui faisait penser à un autre mot, alors il suspendait sa phrase pour réfléchir et les étudiants ne savaient pas s'il fallait se taire ou parler, en fait, il fallait se taire car il réfléchissait. C'est ce que pensaient la plupart de ses élèves, je crois : « son cours était plein de silences » comme me l'avait fait remarquer un autre de ses élèves. » [I Mondange, 2004, p. 6]. Sans doute faut-il voir dans ces formulations, science « en train de se faire » et « déjà faite », une influence *a posteriori* sur le témoignage de la sociologie de Latour. Elles révèlent néanmoins un élément important de l'enseignement de Chaudron.

amphithéâtrale originale, Chaudron parvient à retenir certains étudiants lors de discussions plus informelles où il sait se montrer persuasif.⁸⁰ À partir de 1930, il recrute aussi parmi les ingénieurs des écoles de chimie, ce qui permet de capitaliser des savoir-faire plus techniques, améliorer des montages expérimentaux, des instruments.⁸¹ À Vitry-sur-Seine, Chaudron, adepte de la pluralité scientifique, recherche la plus grande diversité possible de cursus différents : ingénieurs chimistes (Lille, Paris, Nancy), normaliens, polytechniciens, centraliens, étudiants étrangers (Pologne et Roumanie)...⁸² Comment s'y prend-t-il alors que son laboratoire est éloigné – géographiquement et temporellement – des centres de productions d'étudiants parisiens ?

Globalement, le campus CNRS de Vitry-sur-Seine se développe en se tournant vers l'université parisienne et les écoles d'ingénieurs.⁸³ À titre personnel, Chaudron est l'un des mandarins de la Sorbonne, il est aussi chargé de conférences à l'ENS de Sèvres (1939). Il propose aussi indirectement des sujets de thèse financés dans des lieux où il n'enseigne pas mais où il a des contacts, par exemple à l'École de chimie de Nancy. Sa notoriété scientifique peut alors aider à séduire ou impressionner les étudiants.⁸⁴ Il ne suffit pas d'être persuasif et de convaincre des étudiants métissés, encore faut-il avoir des moyens de les financer. Chaudron dispose des crédits du CNRS dont il est sans conteste une des figures très influentes, sa voix est prépondérante puisqu'il devient président en 1951 de la section chimie minérale du Comité national [Chaudron, 1954, p. 6]. Tout sujet de thèse qu'il propose est accompagné d'une bourse de thèse. Or, au début du CNRS, obtenir une bourse c'est pratiquement être engagé. Sa stratégie de recrutement a été efficace puisque en dizaine d'années, entrecoupée par la guerre (1939-1948), le laboratoire passe du point mort à une quinzaine de chercheurs.⁸⁵ En 1954, le personnel de recherche atteint « environ 35 personnes » dont vingt doctorants, cinq ingénieurs et six « aides techniques » CNRS. Parmi les doctorants, les trois-quarts sont boursiers CNRS [CECM, 1954]. Au cours des années

⁸⁰ « j'étais toujours plus attirée par l'enseignement : je voulais passer l'agrégation. Chaudron m'a dit qu'il ne fallait pas que je m'embête avec l'agrégation, que j'allais d'abord finir ma thèse en deux ans. » [I Mondange, 2004, p. 2].

⁸¹ 7 des 26 thèses que Chaudron encadre de 1928 à 1950 sont des thèses « ingénieur-docteur », soit plus du quart [Chaudron, 1954, p. 98-100]. Les besoins techniques sont alors importants pour mettre au point des expérimentations, améliorer des instruments. Le savoir-faire des ingénieurs est donc apprécié. C'est par exemple à un ingénieur de l'ICL, Michel, que Chaudron confie le montage de la diffraction des rayons X à Lille en 1932.

⁸² « Chaudron était un homme original, il voulait avoir des étudiants d'un peu partout » puis « ses élèves venaient d'horizons différents : Montuelle et Talbot étaient de l'université de Lille, Montel de Chimie Paris, Fayard était normalien, il y avait un polytechnicien, un centralien, un Roumain, un Polonais... » [I Mondange, 2004, p. 2].

⁸³ « le campus CNRS de Vitry s'est développé en nouant des liens forts avec l'université et avec les écoles d'ingénieurs. » [I Caro, 2002, p. 4].

⁸⁴ En 1947 et 1948, Chaudron recrute deux ingénieurs de l'École de chimie de Nancy par dépôt de sujets de thèses : « Chaudron avait proposé une thèse financée par le CNRS aux étudiants de la promotion qui me précédait. C'est Collongues qui a accepté la proposition et a été retenu. Il est donc venu au CECM dirigé par Chaudron à Vitry. L'année suivante, Chaudron a de nouveau proposé une bourse de thèse. Cette année-là, il n'y eut qu'une fille qui accepta : c'était moi. [...] Je ne savais pas que c'était le Chaudron des diagrammes des oxydes de fer (réduction du minerai dans les hauts fourneaux), celui dont on nous avait parlé en taupe, sinon j'aurais été beaucoup plus impressionnée. » [I Mondange, 2004, p2]. Ce « dépôt » est rendu possible par un de ses anciens élèves, Faivre, qui y est professeur [Chaudron, 1954, p11 et 99].

⁸⁵ Les différentes sources s'accordent autour de ce chiffre : [CNRS, 1949a] donne dix-sept membres (chercheurs + techniciens ?) ; une photographie de juillet 1949 montre treize personnes sans Chaudron ; [I Mondange, 2004, p. 2] recense 12 personnes présentes lors de sa première année de recherche 1948-49 et rajoute quelques personnes supplémentaires pour l'atelier : « Aurel Berghezan, un Roumain [...], Jean Duflot (École Centrale de Paris), Philippe Albert, Jean Talbot, M. Mouflard, Robert Collongues, M. Pruna, G. Montel, Novak, un Polonais, ... [elle-même] une secrétaire, Mlle Billot, et une technicienne, Annie Binet [...] un atelier dont les ouvriers étaient étroitement associés aux chercheurs. »

cinquante, le CECM constitue l'un des fleurons de la recherche du CNRS. Son comité de direction est bien fourni en mandarins.⁸⁶

Loin de l'image traditionnelle de la tour d'ivoire, le laboratoire de Vitry-sur-Seine est ouvert sur de multiples extérieurs : les autres universitaires, le monde industriel et l'international. Pour nourrir son empire, Chaudron fréquente les autres savants de son temps. Il est par exemple très lié à Irène Joliot-Curie, directrice de l'Institut du radium et prix Nobel de chimie 1935 pour ses travaux sur la radioactivité artificielle. Ils travaillent ensemble sur le « dosage des impuretés par radioactivation ». Quotidiennement, c'est par l'intermédiaire de leurs deux étudiants respectifs : Philippe Albert pour Chaudron et Pierre Sue pour Curie, qu'ils collaborent. Ils se voient aussi personnellement pour échanger des idées, le samedi matin.⁸⁷ De manière générale, Chaudron assiste aux conférences des autres disciplines où il côtoie les métallurgistes (I.3.2), des physiciens comme Pierre Aigrain ou Louis Néel, des physico-chimistes comme Georges Champetier (ESPCI) ou Yvette Cauchois.⁸⁸ Il n'hésite pas à s'opposer aux physiciens ou métallurgistes pour convaincre qu'une bonne pratique expérimentale des solides peut bien se passer de théorie.⁸⁹ Il dirige tour à tour plusieurs sociétés savantes nationales : président de la Société française de minéralogie et de cristallographie (1949), de la Société française de métallurgie (1950) puis de la Société chimique de France (1952) [Chaudron, 1954, p. 6]. Il organise, en 1948, l'un des premiers grands colloques d'après-guerre du CNRS [Picard, 1990, p. 111]. Malgré des réticences par rapport aux théories, Chaudron participe activement à la vie scientifique parisienne en ayant ses entrées dans les différentes communautés : métallurgie, chimie minérale, minéralogie et cristallographie, chimie physique, physique du métal et des solides. Il en retire des idées, et réciproquement y exerce une influence certaine, même au prix d'interventions houleuses. Acteur du décloisonnement disciplinaire, il en tire profit pour intégrer son empire au sein des divers réseaux disciplinaires et asseoir son influence au cœur des communautés connexes.

À cette ouverture disciplinaire répond une ouverture industrielle. Comme Le Chatelier, Chaudron veut faire une science utile et utilisable. Certes la métallurgie est par tradition liée aux applications industrielles. Selon Chezeau [2004], c'est par exemple autour des problèmes industriels que posait l'acier que s'est développée la métallurgie physique. Dès ses travaux de thèse, Chaudron avait abordé des problèmes industriels en traçant les diagrammes d'équilibres des oxydes de fer, qui sont rapidement passés dans l'industrie pour améliorer le fonctionnement des hauts-fourneaux. Par la suite, il développe des contacts avec les industriels du Nord et le ministère de l'Air quand il est à Lille (II.2.1.3). Durant toute sa carrière, il fait travailler certains de ses thésards sur des sujets industriels (aéronautique,

⁸⁶ On y trouve : Jolibois (président jusqu'à sa mort en 1954) puis Georges Champetier, A. Chatelet (doyen de la FdS de Paris), Chaudron, Laffitte, Néel, Albert Portevin, Gustave Ribaud et Léon Moreau (qui en tant que sous-directeur est rapporteur). [CECM, 1954].

⁸⁷ « Il [Chaudron] travaillait sur le dosage des impuretés par radioactivation et collaborait avec Irène Curie (1897-1956). En fait, il avait surtout des rapports avec un jeune et brillant élève d'Irène Curie qui s'appelait Pierre Sue. » puis « Le samedi matin, il recevait parfois Irène Joliot-Curie. » [I Mondange, 2004, p. 3-4].

⁸⁸ Il fréquente assidûment les *Journées Métallurgiques d'Automne* de la Société Française de Métallurgie : il y rencontre les métallurgistes, Bastien, Léon Guillet, des ingénieurs-concepteurs comme Portevin ou Chevenard, des spécialistes de la « physique des métaux » comme Charles Crussard, Jacques Friedel, André Guinier (I.3). Il est lié à Yvette Cauchois, du « Laboratoire de Chimie Physique » à côté de l'ENSCP, à Jean Wyart, du laboratoire de cristallographie de la Sorbonne. Il assiste aux conférences de Pierre Aigrain à l'ENS et Nevill Mott sur l'électronique des solides.

⁸⁹ « Aux *Journées d'automne de la métallurgie*, congrès international très couru, il était parmi les plus écoutés. Dans les années 50, à l'occasion de l'un de ces congrès, je me rappelle son opposition à Bastien, professeur de métallurgie à l'École Centrale de Paris, à propos de la diffusion de l'hydrogène dans le fer. » [I Mondange, 2004, p. 4-5].

nucléaire).⁹⁰ L'industrie le lui rend bien : on lui construit un laboratoire tout neuf à Lille, il reçoit la « médaille d'Or de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale » (1932), est « membre d'honneur de l'Association des Ingénieurs de Liège » (1947) [Chaudron, 1954, p. 6]. Au début des années cinquante, le CECM est lié à diverses commissions CNRS à caractère appliqué : hautes températures (II.3), « Engins auto-propulsés » (H. Moureu), « États de Surface » (Portevin), « Four Solaire » (Général Bergeron). Il travaille aussi en collaboration étroite avec l'Institut de recherches de la sidérurgie (IRSID) (Malcor et Allard) et le Commissariat à l'énergie atomique (Francis Perrin) dont Chaudron est aussi conseiller scientifique [CECM, 1954]. Le CECM accueille aussi de nombreux thésards de l'industrie. Réciproquement, lorsque les étudiants ayant fini leur thèse partent dans l'industrie, ils n'oublient pas la *Chaudronnerie*, ce qui élargit ainsi un peu plus l'empire du maître [Cornet, 1990, p. 7, 15]. Après que Herzog a terminé sa thèse sur les « alumags », il a rejoint les Tréfileries et Laminoirs du Havre qui devaient les produire industriellement. Chaudron en est ensuite devenu conseiller technique [Cornet, 1990, p. 7].⁹¹

Troisième zone d'ouverture : vers le pays européens et les États-Unis. Chaudron est reconnu au-delà des frontières nationales : membre de sociétés nationales – belge, suédoise et italienne – et du « Bureau de l'Union Internationale de Chimie pure et Appliquée » (1951).⁹² Il entretient aussi des contacts personnels avec des savants étrangers : A. Glazunov, « ex-Recteur et professeur à l'École des Mines de Příbram » (Tchécoslovaquie).⁹³, Nevill Mott qu'il affronte en public⁹⁴, mais c'est surtout au sein de la communauté des « réactions dans l'état solide » qu'il est internationalement reconnu (II.4). Sa notoriété internationale lui permet d'attirer des étudiants venus se familiariser avec certaines techniques de pointe à Vitry-sur-Seine.

Grâce à une méthodologie interdisciplinaire (II.2.2.1), une organisation interne structurée en services et un atelier efficace, le Laboratoire de Vitry a su s'imposer comme un lieu de recherche performant. C'est un haut lieu de formation (près de 60% de thésards) mais aussi de recrutement grâce à des liens privilégiés avec le CNRS dont il dépend. Cette

⁹⁰ « HA : Quel était l'état des relations entre science et industrie en France à cette époque [années 1950] ? PH : Il y avait une tradition de collaboration en métallurgie et en chimie: Chaudron et ses élèves, Lacombe, Bénard étaient très impliqués. » [I Hagenmuller, 2001, p. 3]. De nombreux thésards de Chaudron ont été impliqués dans des problèmes industriels : Bénard reçoit aussi « la médaille d'or de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale ». Sur la question du CECM et de l'industrie, l'article de Cornet est très détaillé [Cornet, 1990, p. 15-16]. À la fin des années 1930, l'aéronautique et la *Chaudronnerie* sont très liées puisque de 1935 à 1950, 5 thésards de Chaudron sur 20 (soit 25%) publient un article dans les « Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Air » [Chaudron, 1954, p. 99-100].

⁹¹ « En 1926, les Services de l'Aéronautique s'inquiète[a]nt de la corrodabilité dans l'eau de mer de certaines pièces d'hydravions en duralumin » financent une thèse pour résoudre le problème : elle est menée par Herzog [1926-32] sous la direction de Chaudron. Durant son travail, Herzog « met au point les "Alumags", des alliages d'aluminium, de magnésium et de zinc, qui résistent bien à la corrosion, tout en étant légers comme les duralumins et qui seront fabriqués par les "Tréfileries et Laminoirs du Havre" [dont Chaudron devient conseiller technique] » [Cornet, 1990, p. 7-10].

⁹² Pour la Belgique, Chaudron est « Membre d'honneur de l'Association des Ingénieurs de Liège » (1947) et « Membre correspondant de la Société Royale des Sciences de l'Université de Liège » (1948) ; pour la Suède, « Membre de l'Académie Royale de Göteborg » (1948) ; pour l'Italie : « Médaille d'Or Luigi Losana de la Société Italienne de Métallurgie » (1950) [Chaudron, 1954, p. 6].

⁹³ Chaudron dédicace l'ouvrage *Métallographie. Les diagrammes d'équilibre par questions et réponses* de Glazunov [Glazunov, 1951] dans lequel il loue son « éminent collègue ». Réciproquement, dans la préface, Glazunov a « le plaisir de remercier [son] ami, M. le Professeur Chaudron et son assistante M^{lle} Laurent, qui ont bien voulu relire attentivement mon texte français ».

⁹⁴ « Je me souviens d'une conférence de Nevill Mott, un théoricien anglais, au laboratoire de Chimie Physique. Il se servait de nos résultats pour justifier ses théories et ça semblait déplaire à Chaudron. Je ne sais pas si Chaudron ne voulait pas qu'un théoricien exploite son travail ou s'il voulait simplement être cité, ce que Mott n'avait pas fait » [I Mondange, 2004, p. 5].

dynamique s'est nourrie en permanence d'une ouverture multidisciplinaire, d'une coopération industrielle et d'un échange international. Au début des années cinquante, le développement de techniques très spécifiques (synthèse, cristallographie, mesures) séduit de jeunes thésards étrangers et attire des ingénieurs de l'industrie.⁹⁵ Chaque année, le renouvellement partiel des effectifs induit un regain de créativité, favorise l'originalité et rapporte des financements. Le Laboratoire s'inscrit ainsi au cœur d'un réseau socio-technique étendu dont certains acteurs franchissent souvent les frontières entre fondamental et appliqué, entre France et l'étranger, entre public et privé. Chaudron en particulier a su s'imposer comme un interlocuteur incontournable sur certains matériaux nucléaires ou aéronautiques. D'autres acteurs sont beaucoup moins mobiles : ils restent au sein du Laboratoire, au foyer de la famille scientifique.

II.2.2.3. De l'unité d'une famille scientifique ?

Outre son rôle scientifique, technique, industriel, économique, institutionnel, le laboratoire abrite des relations humaines. C'est cet ensemble de relations qui conduit à la formation sociale d'une famille scientifique. Comment s'articulent ces relations au sein du laboratoire ? Une réponse consiste à analyser une typologie des relations.

La plus évidente sans doute est le rapport hiérarchique maître-élève, extrêmement codifié et prégnant. Chaudron est un maître directif pour ses élèves : ils n'ont pas le choix de leur sujet de thèse – manière courante à l'époque –, ni de leur lieu de travail – Vitry-sur-Seine –.⁹⁶ Le maître impressionne par sa présence et fait accepter, à la paillasse, ses propres valeurs scientifiques : supériorité de l'expérience sur les théories, primauté de l'instrumentation, importance des transpositions. Meticuleux et perfectionniste pour lui-même, il impose ces valeurs aux autres, exige sans cesse la réécriture des manuscrits de thèse, des articles, choisit les résultats qu'il "sent" bien, exclut les autres. Ses étudiants et collaborateurs doivent subir son caractère impulsif et coléreux.⁹⁷ Les chercheurs recrutés sont la plupart du temps des anciens élèves : l'*endo-recrutement* est la norme pour une famille scientifique pérenne. Il a trois principales utilités sociales. Premièrement, il permet au maître d'asseoir un rapport institutionnel, directeur-collaborateur, sur une ancienne autorité maître-élève. La plupart des collaborateurs se plient d'ailleurs à cette stricte autorité : le maître est tout puissant. On l'appelle Monsieur, on déroule le « tapis rouge » quand il arrive. Une attitude respectueuse, souvent figée, parfois protocolaire, se développe entre le nouveau mandarin et ses anciens étudiants.⁹⁸ Deuxièmement, l'*endo-recrutement* favorise une transmission des savoir-faire du

⁹⁵ « on notera que le CECM a reçu, chaque année, plusieurs ingénieurs et docteurs, venant soit de l'étranger, soit de l'industrie [en stage] pour apprendre les principales techniques du laboratoire : préparation de gros cristaux, étude des sous-structures, gaz dans les métaux, emploi de rayons X en chimie minérale, etc... »

⁹⁶ « Dans le domaine scientifique, je pense qu'il l'avait été [directif] mais surtout pour la génération d'avant. Par exemple, quand R. Collongues a fait sa thèse avec G. Chaudron, au CECM, je pense que c'était directif et que lui non plus, il n'avait pas choisi le sujet. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 2]. « Je n'avais pas très envie d'aller à Vitry [...] Pourtant je n'ai pas eu trop le choix, j'ai commencé ma thèse en septembre 1948 au CECM, j'étudiais alors les oxydes de fer. » [I Mondange, 2004, p. 2].

⁹⁷ « Combien de dimanches, combien de soirées, consacrés à la laborieuse rédaction de thèses ? Les mois de vacances eux-mêmes n'étaient pas épargnés qui voyaient se succéder sur la côte normande des chercheurs et leurs manuscrits vingt fois remaniés. » [Cornet, 1990, p. 5]. « Il s'énervait assez facilement [...] avec des caprices. » [I Serreau, 2004, p. 19].

⁹⁸ « Avant 68 les chefs de service du CECM sortaient le tapis rouge lorsque Chaudron arrivait (rires). C'était le mandarinat, le patron tout puissant avait toujours raison. [...] Tout le monde était plus ou moins au garde à vous. [...] C'était un peu l'attitude que des gens peuvent avoir vis-à-vis d'un ministre, encore que je ne me rends pas compte, je ne connais pas de ministre (rires). Un peu comme quelqu'un qui viendrait en audience voir le ministre, qui ne le connaîtrait pas trop, avec des rapports distants. – PT : Ils avaient à la fois, du respect et de

maître sur plusieurs générations. L'apprentissage est soigneusement organisé, par degrés d'ancienneté, d'une génération à l'autre : les aînés, que Chaudron a lui-même formés, forment les plus jeunes, qui à leur tour formeront les suivants.⁹⁹ Cette transmission est efficace si l'on considère la longévité des trois constantes méthodologiques au sein de la *Chaudronnerie* (II.2.2.1). Troisièmement, cette structure auto-engendrée explique en partie la relative continuité des thèmes de recherche : intérêt pour la pureté, interaction solide-gaz, effets des rayons radioactifs sur les matériaux, réfractaires, défauts dans les oxydes.¹⁰⁰ L'organisation en services pérennise une forme de continuité même si chaque chef de service dispose d'une autonomie, même restreinte (IV.3.1), et qu'il a le choix de partir. Néanmoins, le renouveau permanent par de jeunes thésards venus d'horizon différents a tendance à bousculer cette belle organisation qui rêve de scissiparité, de clonage. Comme dans toute famille, la balance s'équilibre entre entraides et oppositions générationnelles. Un tel équilibre crée un deuxième type de liens senior-junior, eux-aussi constitutifs de la famille au même titre que le lien maître-élève.

L'autorité n'est pas le seul mode d'expression en famille : Chaudron sait aussi jouer sur la compétition entre élèves, sur l'intéressement de ceux qu'il distingue souvent au détriment des autres. Certains élèves comptent plus que d'autres dans les priorités du maître.¹⁰¹ Son côté calculateur est contrebalancé par une personnalité attachante comme le soulignent ceux qui l'ont connu : générosité envers ses anciens condisciples de la Sorbonne, « charisme » et « paternalisme » envers ses étudiants. Il s'intéresse à leurs problèmes – scientifiques certes mais personnels aussi, leurs « histoires de brigands » –, il compatit ou condamne.¹⁰² Mais il souhaite aussi placer les thésards dans les meilleures conditions pour réussir, il n'hésite pas pour cela à les faire pénétrer dans son espace privé, quelquefois au détriment de ses proches.¹⁰³ Le caractère du personnage peut se résumer par cette formule : « il était à la fois attachant et redoutable » comme l'a suggéré l'une des anciennes de Vitry. L'ambiance générale des thésards au laboratoire est excellente, les repas se prennent en

l'admiration ? – DS : De l'admiration à une certaine époque, oui et du respect toujours. – PT : *Des marques de respect.* – DS : Oui, mais une attitude assez figée. – PT : *Protocolaire ?* – DS : [...] des attitudes beaucoup plus protocolaires. [I Serreau, 2004, p. 4].

⁹⁹ « Les chercheurs présents [...] encadrent bénévolement les élèves, à la demande de Georges Chaudron. Les cours ont lieu le samedi pour ne pas gêner les recherches et pour bénéficier du matériel libéré par le personnel du Laboratoire. » [Cornet, 1990, p. 5].

¹⁰⁰ Ce troisième point est suggéré par [Cornet, 1990, p. 9] : « La présence des principaux élèves du Professeur G. Chaudron aux débuts du Laboratoire assure cette pérennité des thèmes. »

¹⁰¹ « La grande époque Chaudron était aussi celle des enveloppes distribuées plus ou moins généreusement aux uns et aux autres. En particulier aux thésards. Son ministre des finances était Mademoiselle Laurent. » [I Serreau, 2004, p. 4]. « En fait, j'ai passé un an à attendre un nouveau sujet de thèse en 1950 : Chaudron était très occupé. » [I Mondange, 2004, p. 2].

¹⁰² « il [Chaudron] avait pas mal de charisme » [I Serreau, 2004, p. 19]. « Il y avait aussi deux anciens du laboratoire Le Chatelier, des anciens camarades de Chaudron, qui avaient été ruinés par la guerre et qui venaient rendre des petits services : « le père Vial » [...] et « le père Bossuet » qui [...] racontait des anecdotes sur le laboratoire Le Chatelier (*le thé du samedi après-midi* quand les petites repasseuses venaient apporter les blouses propres). » « Talbot jouait au football je me rappelle, il était au PUC (Paris Université Club) et ça ne plaisait pas à Chaudron. » « Je peux dire qu'il était très paternaliste, dans le bon et le mauvais sens du terme. Il était très attaché à ses étudiants pour les questions scientifiques mais aussi pour les problèmes plus personnels. Il lui arrivait d'être peiné pour eux. Je me rappelle qu'au cours de la journée du samedi, il lui arrivait de me raconter les « histoires de brigands » comme il disait, les potins de ses élèves. » [I Mondange, 2004, p. 2-5].

¹⁰³ « Pour la rédaction des thèses, il « invitait » même ses étudiants à passer quelques jours pendant les vacances d'été dans sa maison à Étretat. » [p. 5] « parfois il n'avait pas le temps de me voir le matin et il m'emmenait chez lui pour le déjeuner. Mme Chaudron n'était pas toujours ravie de me voir arriver. » [I Mondange, 2004, p. 4]. Témoignage de André Michel : « Aux côtés de ce grand maître de la chimie, Madame Chaudron tient une place très importante et les élèves de G. Chaudron lui doivent un lourd tribut de reconnaissance. Combien de repas n'ont-ils pas partagés, repas au cours desquels la conversation était accaparée par de longues discussions sur les problèmes du jour que ce soit à Lille au 10, rue Jean Bart ou à Paris, rue Bonaparte. » [Cornet, 1990, p. 5].

commun dans la bonne humeur et la coopération. Après la relation maître-élève puis senior-junior, c'est le troisième type constitutif de la famille : celui de la camaraderie élève-élève, de l'affection.¹⁰⁴ Là, les affinités sont individuelles, imprévisibles, avec en toile de fond une certaine solidarité entre jeunes.

Au sein de la famille, les individus sont sexués aussi. Être un homme ou une femme a des implications physiologiques certes mais plus encore des conséquences sociales. Pour les études d'abord, on incite les jeunes filles à s'orienter vers l'université et la recherche publique plutôt que vers les écoles d'ingénieurs et l'industrie.¹⁰⁵ Au laboratoire ensuite, les relations hiérarchiques et de camaraderie sont modifiées par la donnée sexuelle. Numériquement d'ailleurs, les thésardes sont beaucoup moins nombreuses : deux seulement terminent une thèse entre 1926 et 1950 contre trente-deux hommes, soit 6% [Chaudron, 1954, p. 98-100]. Ce faible pourcentage correspond à peu près à celui des écoles d'ingénieurs de chimie parisiennes pour la même période que ce soit à l'ESPCI ou à l'ENSCP.¹⁰⁶ Par la suite, sur la période 1948-1958, le taux reste faible à Vitry : sur toute la période, il n'y a qu'une seule fille qui soutient une thèse [I Mondange, 2004, p. 2] alors que simultanément le nombre d'étudiantes augmente fortement, jusqu'à vingt ou trente pour cent pour certaines écoles parisiennes (I.2.2).¹⁰⁷ Jusque dans les années cinquante, la *Chaudronnerie* est donc globalement peu ouverte aux femmes pour la recherche, peut-être moins encore que le monde académique dans son ensemble. Chaudron ne recrute une jeune fille que s'il n'a pas le choix : il se méfie de leur coquetterie, doute d'elles en matière de recherche. Les pionnières ont une vie scientifique difficile, une carrière moins rapide que celle des hommes de même formation et de même âge. Chaudron rend la tâche plus ardue parce qu'il leur apporte globalement moins d'attention au niveau scientifique.¹⁰⁸ Les règles vestimentaires qui leur sont imposées les cantonnent dans

¹⁰⁴ « Il y avait une très bonne ambiance dans ce labo, on était content d'être au laboratoire de Monsieur Chaudron, les gens se serraient vraiment les coudes. » [p. 3]. « Pendant les trois premiers mois où j'étais là [1948], il n'y avait pas de cantine et chacun apportait sa gamelle. Ensuite, on s'est organisé : Duflot, qui était parisien, achetait aux Halles des sacs de patates et les ramenait au laboratoire où la femme de ménage avait accepté de faire des frites ou des pommes de terre bouillies. On avait un plat chaud et on mangeait tous ensemble. Il y avait vraiment une bonne ambiance. » [I Mondange, 2004, p. 2]

¹⁰⁵ Aux *Journées d'information de la chimie*, en septembre 1958, Jacques Bénard tient le discours suivant : « Je pense que pour celles qui ont le désir de faire de la chimie à l'échelon supérieur, il est infiniment préférable de préparer la licence à la Faculté que de chercher à entrer dans une école d'Ingénieurs. Ce faisant elles éviteront de prendre la place de leurs camarades masculins dont l'industrie a le plus grand besoin, sans que soient compromises – bien au contraire – leurs chances de trouver dans un laboratoire, une situation compatible avec leurs possibilités. » [Bénard, 1958].

¹⁰⁶ Je prends les écoles d'ingénieurs comme référence parce que l'accès à leurs annuaires est plus facile que les statistiques des universités. La proportion de filles dans les écoles d'ingénieur indique une limite basse par rapport aux universités. Pour l'ESPCI, les étudiantes représentent environ 7% des promotions entrées à l'École entre 1918 et 1942 (donc sorties entre 1921 et 1945, ce qui correspond *grosso modo* à la période d'embauche des thésards de Chaudron qui soutiennent entre 1926 et 1950) [ESPCI, 2004]. À l'ENSCP, elles représentent environ 10% des promotions à la fin des années trente (I.2.2).

¹⁰⁷ Les étudiantes de l'Institut de Chimie de Nancy représentent 0% pour la promotion qui sort en 1947, 4% pour la promotion 1948, d'après les souvenirs [I Mondange, 2004, p. 1]. Pour l'ENSCP (dans laquelle Chaudron peut puiser à partir de 1950 sans difficulté), les taux sont bien plus élevées : 30% (promotion sortie en 1949), 25% (1950), 29% (1951) [ENSCP, 2005].

¹⁰⁸ Le témoignage de l'une des deux pionnières sur son recrutement est intéressant : « Il [Chaudron] n'était pas très disposé à accueillir une fille dans son laboratoire. J'ai su après coup que Chaudron avait demandé à Collongues quel genre de fille j'étais, si je me peignais le visage (rires). Il m'a vue au cours d'un entretien et ensuite il m'a engagée. » [I Mondange, 2004, p. 1]. Pour preuve du désintéressement de Chaudron envers les filles, voici le récit de sa thèse par Mondange : « j'ai commencé ma thèse en septembre 1948 au CECM, j'étudiais alors les oxydes de fer. Ce qui est étrange, c'est que par la suite, Chaudron ne m'a jamais directement demandé ce que je faisais au niveau scientifique [...] Je me suis arrêtée en novembre 1949 pour mon premier enfant, une fille. Après ma maternité, je ne voulais plus être chercheuse, c'est dur quand on a un enfant et puis j'étais toujours plus attirée par l'enseignement : je voulais passer l'agrégation. Chaudron m'a dit qu'il ne fallait pas que je m'embête avec l'agrégation, que j'allais d'abord finir ma thèse en deux ans. Elle a encore duré huit

un rôle typiquement féminin : les pantalons restent interdits jusque après Mai 68.¹⁰⁹ La propre épouse de Chaudron, elle-même diplômée de l'Institut de chimie de Paris, ne travaille pas et s'occupe de la maison. Au laboratoire, les femmes sont plus souvent aux postes techniques ou de secrétariat que chercheuses.¹¹⁰

De manière générale, le personnel technique, ingénieurs, techniciens et administratifs (ITA au CNRS, IATOS à l'université), occupe une position à part au laboratoire. Alors qu'ils participent au quotidien au travail du laboratoire, la reconnaissance professionnelle ne dépasse pas le cercle familial, contrairement aux chercheurs qui publient dans des revues communautaires. Au sein même des équipes, leur travail n'est pas rendu public par les rapports d'activité, ceux-ci ne mentionnant que les publications des chercheurs. De même que la technique est culturellement dévalorisée par rapport à la science (la première suivant la deuxième), les techniciens sont traditionnellement dénigrés par les chercheurs. S'installe ainsi, en sus du rapport hiérarchique, un sentiment d'infériorité. Disparus des archives, seuls demeurent les souvenirs de certains acteurs pour décrire ce travail essentiel laissé dans l'ombre. Au sein de la famille scientifique, les techniciens occupent donc une place très spécifique. Alors que leur rôle les tient proches des instruments et de la matière, qu'ils passent tout leur temps de travail au laboratoire, cœur de la famille scientifique, ils ne sont pas considérés par les chercheurs comme détenteurs d'un savoir ou savoir-faire propre à la famille. Comme si l'invisibilité de leur travail quotidien masquait leur identité familiale. Socialement indispensables au fonctionnement de l'appareil scientifique, leur contribution n'est pas jugée suffisamment spécifique pour porter un bout d'identité collective.

Ainsi, en *Chaudronnerie*, à l'écho d'une originalité scientifique (heuristique interdisciplinaire et instrumentale) répond un agencement social à l'unisson du système mandarinale que porte l'Université vers 1950 (I.2.1). Les chercheurs y sont valorisés par rapport aux techniciens, les hommes favorisés par rapport aux femmes. C'est autour de ces codes culturels que se développe le tissu familial autour de la figure centrale du patriarcat, régente absolue et paternaliste. Plusieurs types de relations liant pouvoir et savoir structurent l'organisation interne du laboratoire : du maître aux élèves (respect, admiration), des seniors aux juniors (transmission de savoirs et savoir-faire), entre jeunes d'une même génération (camaraderie et concurrence). C'est, au quotidien, entre les paillasses et l'atelier, entre les bureaux et la table du midi que se nouent ces relations sociales, qui deviennent si personnelles, si intimes que surgit la famille quasi organique. Consciemment vécue par les membres, l'image de la famille s'impose aussi à l'extérieur.¹¹¹

ans ! [...] En fait, j'ai passé un an à attendre un nouveau sujet de thèse en 1950 : Chaudron était très occupé. [...] En 1958, je me rappelle que l'un des étudiants m'a dit que j'étais la première fille à présenter une thèse sous la direction de Chaudron : j'étais très fière car c'était difficile pour les filles à cette époque, nous n'étions pas prises au sérieux. » [I Mondange, 2004, p. 2-3].

¹⁰⁹ « Les filles ne pouvaient pas venir en pantalon. Mais c'était plus Chaudron qui voulait cela [...]. On ne plaisantait pas avec les tenues. » [I Serreau, 2004, p8]

¹¹⁰ « Mademoiselle Adeline Cacan entre le 1er décembre 1937 comme secrétaire [...]; Mademoiselle France Ellis arrive le 1er mai 1938 et se trouve employée comme aide-chimiste. [...] Hélène Bornet [...] concierge [...] Madame Cholet entrera au LCTC pour travailler avec J. Bénard. [Seule] Madame Michel, l'épouse du Professeur A. Michel [...] bénéficie du statut de chercheur et] travaille [...] d'abord à la Faculté des Sciences de Paris [...] puis au Laboratoire [...] durant la guerre. » [Cornet, 1990, p. 6-7].

¹¹¹ La situation est ainsi décrite par l'un de ses pairs [Lebeau, 1950, p. XIV] : « L'étendue et la qualité de la production scientifique de G. Chaudron, la clarté de son enseignement, l'attraction qu'il exerce sur les jeunes chercheurs qu'il retient près de lui, en font un véritable chef d'Ecole. Son laboratoire, merveilleusement outillé et organisé, peut être cité comme un modèle. »

II.2.3. Essaimage entre rayonnement impérial immédiat et homogénéisation des élites à venir

Si j'ai raconté l'essor de la Chaudronnerie à travers l'ascension sociale de Chaudron (II.2.1) puis décrit quelques constantes récurrentes de cet empire social (II.2.2), jusqu'à présent, j'ai passé sous silence l'un des principaux ressorts de cette dynamique : l'essaimage. Si la famille se caractérise d'abord par une organisation de type filial, elle ne peut tenir sans un partage de certaines valeurs ou méthodes (expérience, instruments, transpositions) communes acquises dans le creuset du laboratoire souche. Par ce partage, elle se rapproche d'ailleurs de l'« école de recherche » [Geison, 1981]. Mais la famille ne devient empire que lorsqu'elle parvient à placer ses héritiers en-dehors du creuset central.

Or, Chaudron a su armer ses anciens élèves pour qu'ils trouvent des positions un peu partout, en écoles d'ingénieurs : Forestier à Nancy, Michel à Lille, Lacombe aux Mines ; dans les universités : Faivre à Nancy, Bénard à Lyon [Chaudron, 1954, p. 11] ; dans les industries : Waché comme bras droit de Chevenard aux « Aciéries d'Imphy » [Lebeau, 1950, p. XIII], Hérenguel aux « Tréfileries et Laminoirs du Havre » [Cornet, 1990, p. 7]. Si le creuset de formation a été suffisamment prégnant et a satisfait les disciples, ils vont s'en faire les apôtres à l'extérieur. Ce faisant, cette dissémination accroît l'influence de l'empire. Si la Chaudronnerie s'est imposée à l'échelle nationale (et internationale), c'est parce que Chaudron (puis ses disciples) ont su être assez habiles pour trouver le bon équilibre entre un impératif de formation (pour cela, il s'agit de garder des cadres) et une stratégie de dispersion (qui répartit des ambassadeurs ailleurs). La réussite d'un empire scientifique lie donc la question de la formation à celle de la réplique.¹¹²

La construction d'empire suscite un phénomène intéressant : elle tend à créer des liens privilégiés (affection, confiance, soutien mutuel) entre des individus qui partagent aussi des convergences épistémologiques ou méthodologiques (parce que élevés dans le même creuset) et qui obtiennent des promotions sociales (grâce à l'influence sociale et cognitive de l'empire). Ainsi, elle favorise présentement une convergence de vues entre ceux qui vont devenir les mandarins de l'Université, demain. En quelque sorte, elle assure une reproduction d'élites sociales possédant des représentations voisines du monde.

¹¹² L'exemple le plus marquant se situe entre Nancy et Paris. Deux ans d'affilée, en 1947 et 1948, Chaudron recrute un étudiant puis une étudiante de l'ENSIC par simples dépôts d'un sujet de thèse financée à l'École de chimie de Nancy (ENSIC). Deux dépôts donnent lieu à deux réponses positives, beau résultat dans la mesure où sa notoriété scientifique ne joue pas et qu'il n'y a pas enseigné : « Je ne savais pas que c'était le Chaudron des diagrammes des oxydes de fer (réduction du minerai dans les hauts fourneaux), celui dont on nous avait parlé en taube, sinon j'aurais été beaucoup plus impressionnée. » [I Mondange, 2004, p. 2]. Pourquoi et comment Chaudron opère-t-il à longue distance de son fief parisien ? Le choix de l'École de Nancy n'est pas anodin : le directeur de l'École de chimie est l'un de ses tout premiers élèves, Forestier, qui va donc favoriser le dépôt des sujets. L'histoire de Nancy se poursuit en *Chaudronnerie* lorsque, quelques années plus tard, Faivre y devient professeur de physique du métal « grâce à l'appui de G. Chaudron » [Cornet, 1990, p. 5]. Les interactions maître-élève forment ainsi une chaîne de favoritisme social : Faivre obtient l'appui de Chaudron qui influence Forestier. Les interactions positives peuvent être vues comme des échanges de bons procédés. Au sein du LCTC, l'étudiant et l'étudiante recrutés à Nancy vont garder entre eux des liens privilégiés : « par la suite, Chaudron ne m'a jamais directement demandé ce que je faisais au niveau scientifique, il passait toujours par l'intermédiaire de Collongues [l'autre étudiant de Nancy] pour savoir l'avancement de mon travail. » [I Mondange, 2004, p. 2]. Cette interaction n'est pourtant pas forcément facile à saisir en terme de signe de la force : « J'aimais discuter de recherche avec lui [Bénard], ce que je n'ai jamais pu faire avec Collongues, je ne sais pas pourquoi : nous étions sans doute trop proche comme anciens de Nancy ; quand je voulais parler science, il commençait toujours à plaisanter et c'était fini. » [I Mondange, 2004, p. 6].

En résumé, la *Chaudronnerie* s'impose au milieu du siècle comme une baronnie scientifique de premier plan sur les terres françaises. Son approche des solides n'est pas globale mais pragmatique. Elle s'appuie sur deux matrices disciplinaires en métallurgie et chimie minérale, que Chaudron a en grande partie héritées de Le Chatelier. Ces deux empreintes associées à une classification élémentaire de la matière (II.1.1) déterminent non pas un objet solide mais des solides : métaux, oxydes métalliques, phosphates, qui sont synthétisés et caractérisés par de multiples méthodes : fours à haute température, diffraction des rayons X, pratiques de paillasse. Le Laboratoire Central des Traitements Chimiques (puis Centre d'étude de chimie métallurgique) présente une hybridation scientifique et technique qui place ses objets d'étude à l'interface des disciplines : chimie minérale et métallurgie surtout, mais aussi chimie-physique, voire cristallographie, physique du métal ou des solides. On produit des publications, écrites en français, et on colonise par essaimage le paysage institutionnel (surtout universitaire). Le métissage disciplinaire est rendu concret par une nouvelle expression : « chimie métallurgique », que porte le nouveau du Laboratoire central à partir de 1953 : le Centre d'étude de chimie métallurgique (CECM). Deux autres caractères marquent le développement de la *Chaudronnerie* : l'affirmation d'une science qui doit être utile et l'ouverture vers l'international. CEA, ministère de l'Air, IRSID sont des partenaires privilégiés, qui par leur vocation appliquée orientent (partiellement) le choix des sujets : réfractaires, purification des métaux, lutte contre la corrosion des métaux, étude des surfaces. Malgré cette ouverture vers les industriels, la science prime sur la technique dans l'imaginaire de la *Chaudronnerie*. D'ailleurs, les financements (salaires, thèses, fonctionnement) dépendent principalement du CNRS, et un peu de l'université. Vers l'étranger, l'aura de la *Chaudronnerie* est grand : on organise un colloque international, on réfute un futur prix Nobel dans les rencontres internationales, on attire des thésards d'Europe de l'Est, on participe aux instances scientifiques occidentales et aux sociétés savantes européennes.

II.3. Hautes températures et réfractaires : un thème entre science et industrie

Après la Deuxième Guerre mondiale, le CNRS a jugé bon de fédérer des groupes préexistants sous forme de commissions (I.2.3). La « Commission des hautes températures et des réfractaires » est l'une d'entre elles. Or, l'étude de cas de la *Chaudronnerie* (II.2) a suggéré à quel point les hautes températures sont indispensables pour fabriquer des composés solides (métaux et oxydes). Poursuivant la typologie des groupes de chimistes aux prises avec les solides, je propose ici l'analyse d'une telle commission et m'interroge sur la représentation des solides qu'elle évoque. Pour mieux en saisir la dynamique, je commence par suivre la genèse entre-deux-guerres du groupe des hautes températures (II.3.1), qui conduit après-guerre à la création de la commission et aux actions qu'elle mène (II.3.2).

II.3.1. Le mécénat privé pour encourager la recherche appliquée (1921-1939)

Au sortir de la Première Guerre mondiale, un riche industriel, français et patriote, le baron Edmond de Rothschild, désire participer à l'effort scientifique national, plus précisément il voudrait soutenir des recherches à vocation appliquée. Conseillé par divers scientifiques, il crée une première « Fondation Edmond de Rothschild pour le développement

de la Recherche scientifique » (1921-31) avec un double objectif : constituer une « élite de savants [...] à l'abri du besoin » et l'orienter « dans la voie des applications de la Science » en vue de développer les « forces économiques de la Nation ». ¹¹³ La Fondation va donc financer directement des individus « par la création de bourses » mais aussi des laboratoires pour leur permettre d'« acquérir les appareils indispensables à leurs travaux ». Elle subventionne en particulier les laboratoires de Curie [Boudia, 2001], Langevin, Perrin et Urbain (II.2.1.4). Ayant choisi une approche « physico-chimique », elle est largement pluridisciplinaire, réunit des physiciens, des chimistes et des biologistes. Son comité de direction rassemble quelques mandarins de ces disciplines. ¹¹⁴

II.3.1. Le Comité Rothschild (1921) et la rédaction des *Fours électriques et Chimie* (1924)

L'une des premières initiatives de la Fondation Rothschild est la constitution en 1921 d'un « Comité des Hautes Températures » réunissant physiciens et chimistes autour de recherches appliquées dans le domaine des hautes températures. La direction du projet est confiée à Paul Lebeau. Héritier de Moissan, Lebeau est un universitaire influent de la chimie française qui, pendant l'effort de guerre, s'est illustré pour la mise au point de gaz de combat et de masques à gaz. ¹¹⁵ La première mission que se donne le Comité est la rédaction d'un ouvrage visant à « diffuser et mettre à jour les différents moyens modernes dont disposent les chimistes pour produire des hautes températures. » *Les Fours électriques et Chimie* paraît trois ans plus tard [Lebeau, 1924]. Les sept premiers chapitres font la revue de sept types de four électrique tandis que le dernier décrit les techniques de mesure des hautes températures (« pyrométrie »). En annexe, des tableaux thermodynamiques fournissent « des constantes physiques [obtenues] à l'aide des fours électriques ». Ce sont des « déterminations physico-chimiques » sur des « corps simples » ou des « réfractaires » : « points d'ébullition », « tensions de vapeurs », « densités » et « réduction à haute température » pour les corps simples ; « points de fusion », « volatilisation » et « conductibilités calorifiques » pour les réfractaires.

Qui sont les rédacteurs de l'ouvrage ? Parmi les huit collaborateurs, on trouve cinq chimistes de la famille Lebeau, Lebeau lui-même et quatre anciens élèves de son laboratoire : Paul Jolibois (II.2.1.2), Augustin Damiens, Marius Picon et C. Bedel. ¹¹⁶ Seuls Picon et

¹¹³ « La guerre a montré que le concours des Sciences physico-chimiques était indispensable à la défense nationale et que, dans la paix, les découvertes des Sciences physico-chimiques peuvent apporter une contribution puissante au progrès économique du Pays. Conformément à ces considérations, la Fondation se donne pour objet d'encourager la formation d'une élite de savants en les mettant à l'abri des soucis matériels et en dirigeant leurs travaux dans la voie des applications de la Science au développement des forces économiques de la Nation. » [Mayer, 1953].

¹¹⁴ « Son Comité de Direction comprenait : le Doyen Appell, de la Faculté des Sciences, Président ; le Professeur Charles Moureu [académicien depuis 1911], Vice-Président ; le Professeur André Job, Secrétaire général ; les Professeurs Abraham et Lebeau ; Me Weill, Conseiller technique du Fondateur [puis Jean Perrin en 1922]. Au Conseil d'Administration figuraient en outre : le baron Edmond de Rothschild, les Professeurs Charpy, Le Chatelier, Haller [académicien depuis 1900], Lacroix, Langevin, Lippmann, Matignon [chaire Collège de France], Rateau, Urbain. » [Lebeau, 1953].

¹¹⁵ Diplômé de l'EMPCI (1888), élève puis collaborateur de Henry Moissan au Laboratoire de chimie minérale de la faculté de pharmacie pendant près de 17 ans (1890-1906). Il est ensuite nommé titulaire de la chaire de toxicologie de la même faculté de pharmacie (1908-1918) avant d'obtenir la chaire de chimie minérale qu'avait occupée son maître [Champetier, 1961]. À propos de Paul Lebeau, voir [Evrard, 1988]. Pour la guerre chimique, voir [Lachaux & Delhomme, 1985 ; Deré, 2003].

¹¹⁶ À l'époque où l'ouvrage est rédigé, Jolibois travaille aux Mines de Paris sur le comportement du « plâtre » par pesée à l'évaporation (1923-27) et les traces « d'or et de métaux alcalins » par « l'emploi de spectrographe »

Jolibois étudient des solides minéraux tandis que Damiens et Bedel sont clairement orientés vers un tout autre domaine : la chimie des gaz [Morette, 1959]. Les trois autres collaborateurs sont des physiciens sans liens directs les uns avec les autres : Gustave Ribaud, Pierre Fleury et Henri Weiss.¹¹⁷ On peut penser que les collaborateurs de l'ouvrage sont aussi les principaux membres du Comité Rothschild. Au début des années 1920, la structure du Comité est donc relativement simple : Lebeau et Ribaud en sont les deux figures tutélaires. Ses objectifs sont modestes : le groupe cherche à promouvoir, par un ouvrage d'information, les techniques de production des hautes températures, et ciblent des chercheurs en physique et chimie. Ses espérances : toucher à la fois « la Science et l'Industrie » [Lebeau, 1924]. Cette base documentaire accessible – un ouvrage sur les hautes températures en chimie – a permis de définir un petit groupe de chercheurs intéressés par les hautes températures. Comment se situe-t-il dans un ensemble plus vaste ? Le travail du Comité reflète-t-il une communauté des hautes températures à l'échelle nationale ?

II.3.1.2. Proto-communauté et dynamisme des hautes températures

Pour trouver les premiers indices, retournons à l'introduction de l'ouvrage collectif. Lebeau y exalte la « fécondité [...] de l'œuvre de Moissan », précurseur génial de la « Chimie des hautes températures » qu'il a menée vers un état de quasi-achèvement grâce à son four à arc de carbone. Les progrès, lents depuis, méritent pourtant une revue que les collaborateurs de l'ouvrage s'attachent à détailler. Interprétations en cascade de l'historien : 1°) Lebeau suggère implicitement que la chimie des hautes températures est pour une grande part assimilable aux fours électriques ; 2°) par ses travaux précurseurs, Moissan apparaît ainsi comme le pionnier de la chimie des hautes températures ; 3°) le Comité Rothschild reconnaît sa dette et se place résolument sous les auspices du four électrique de Moissan ; 4°) par cette allégeance, la chimie des hautes températures reconnaît au Comité le droit de représenter la communauté française. Par une succession de sous-entendus, Lebeau suggère que la chimie des hautes températures, fondée par Moissan grâce au four à arc qui lui a valu une partie de son prix Nobel (1906), prend corps autour du Comité Rothschild. Il revendique ainsi une descendance directe de la chimie des hautes températures à travers la famille Moissan, c'est-à-dire la sienne. Il voudrait transformer le Comité en porte-parole de la communauté. Le récit suggéré relie en quelques décennies la mise au point d'une technique (four électrique à arc) à

[Jolibois, 1937]. Il rédige le chapitre VII sur « les fours électriques à étincelle et à gaz ». Les trois autres anciens élèves de Lebeau sont des pharmaciens de son laboratoire à la faculté de pharmacie. Damiens, professeur agrégé, et Bedel, préparateur, se penchent sur « l'analyse des gaz », Damiens rédige le chapitre VI sur « les fours électriques à arc » avec une annexe de Lebeau sur ceux du « Laboratoire d'électrochimie et électrometallurgie de Grenoble », dirigé par Flusin. Bedel ordonne les tableaux de constantes physiques en annexe. Picon, qui a repris les travaux de Moissan sur la synthèse de diamant, utilise le principe du four électrique à électrode de graphite en essayant de contrôler l'atmosphère. « Il y a un four Picon qui fait un peu suite au four Moissan. Au contraire [de celui de Moissan], le four Picon, dont nous avons encore un exemplaire, était un four à résistance de graphite qui fonctionnait sous atmosphère contrôlée. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 4]. Picon est donc chargé des chapitres III « les fours électriques à vide » et IV, « les fours électriques sous pression » [Lebeau, 1924].

¹¹⁷ Ribaud, après une thèse à l'ENS, rue d'Ulm à Paris (1919), est nommé professeur à l'Institut de Physique à la faculté des sciences de Strasbourg (1920). Il lance simultanément un Laboratoire de mesures des hautes températures, financé par la Fondation Rothschild [Lebeau, 1950 ; Chaudron, 1957]. Il rédige les chapitres II « les fours électriques à résistance de carbone » et V « les fours électriques à induction à basse et haute fréquence ». Fleury, normalien, diplômé en 1920, devient « préparateur à l'École normale supérieure dans le laboratoire d'Abraham pour réaliser une thèse de photométrie » (1921-1925) [Fontanon & Grelon, 1994]. Abraham occupe au comité de direction de la Fondation une place analogue à celle de Lebeau, Fleury participe au projet de Lebeau et à la rédaction du chapitre I, « les fours électriques à résistance métallique ». Enfin, Weiss, « préparateur à la Faculté des Sciences de Paris », rédige le chapitre n°8 sur la « pyrométrie ».

la fondation d'un champ de recherche (chimie des hautes températures) par une filiation familiale exclusive (Moissan) dont le Comité se fait le porte-parole national actuel (années 1920).

Cette revendication, assez exclusive si l'on croit l'interprétation précédente, surprend au présent (puisqu'elle assimile presque Comité et communauté) et au passé (oubli des autres traditions). Car, la chimie des hautes températures ne s'est-elle pas aussi construite grâce aux métallurgistes (comme Le Chatelier) et à certains chimistes étudiant les solides minéraux (comme Urbain). En élargissant la perspective, le Comité des hautes températures est-il encore représentatif de la communauté ? Si l'on s'intéresse uniquement aux chimistes, ni les élèves de Le Chatelier, ni ceux de Urbain n'appartiennent au comité. Or, non seulement Urbain et Le Chatelier ont incité leurs élèves à recourir aux techniques de haute température mais encore ils siègent au conseil d'administration de la Fondation. Les traditions chimiques et métallurgiques s'ignorent-elles officiellement parce qu'elles sont concurrentes ?¹¹⁸ Les traditions pourtant ne sont pas indépendantes. Le Chatelier remplace Moissan à l'Académie des sciences (section chimie). Lebeau travaille même durant deux ans (1906-08) dans le laboratoire de Le Chatelier. Il y encadre Jolibois durant une partie de sa thèse (1905-1910), au moins jusqu'en 1908, probablement jusqu'à la fin. Jolibois constitue d'ailleurs le pont par excellence entre les deux familles : formé au laboratoire Le Chatelier, par Lebeau, il aide Chaudron lors de son passage à l'École des Mines (II.2.1.2), est présenté comme son ami au moment où il participe précisément au Comité Rothschild. Le Chatelier soutient Lebeau lors de sa candidature à l'Académie des Sciences en 1919, à la mort de Jungfleisch [Le Chatelier, 1919] tandis que Lebeau soutient Chaudron à la direction du LCTC en 1938 (II.2.1.4).

Assimiler le Comité Rothschild à la communauté des hautes températures n'est pas bien sérieux. Lui reconnaître un rôle moteur est plus convaincant. Il s'efforce de promouvoir le four électrique pour produire des hautes températures auprès de chimistes et de physiciens. Autour du Comité, de nombreux acteurs évoluent dans le champ des hautes températures. Au moins quatre mandarins de l'Université et leurs élèves y participent au début des années 1920 avec leurs propres traditions : Le Chatelier (chimie et métallurgie), Lebeau (chimie minérale et hautes températures), Urbain (chimie organique et chimie physique), Ribaud (physique et thermodynamique). Les hautes températures constituent un thème de recherche à la mode entre-deux-guerres : deux des trois chaires de la Sorbonne qui sont créées entre 1909 et 1940 sont orientées vers elles. En 1926, la Ville de Paris soutient la création d'une chaire de « chimie des combustibles », qui sera financée par la Société du gaz de Paris. Elle échoit à Alphonse Mailhé qui l'occupe jusqu'à sa mort, en 1932 [Charle & Telkes, 1989, p. 190-191]. L'année suivante, elle est remplacée par une chaire des « hautes températures » avec le même financement. Cette fois-ci, c'est Ribaud qui obtient la chaire et la garde vingt ans (1933-1954) [Charle & Telkes, 1989, p. 247-249].¹¹⁹

Ainsi, les hautes températures représentent un domaine de recherche très actif au cours des années vingt puis trente. Physique et chimie universitaires y rencontrent des industriels. Le Comité Rothschild y joue un rôle fédérateur certes mais non primordial. Point d'ancrage

¹¹⁸ Par exemple, Chezeau [2004] ne mentionne pas le four électrique de Moissan, qui est pourtant contemporain de l'émergence de la métallurgie physique.

¹¹⁹ Il n'est pas évident de trancher, d'après [Charle, 1994], si la chaire des « hautes températures » (détenue par un physicien) remplace celle de « chimie des combustibles » (à la mort du chimiste Mailhé) ou si les deux chaires coexistent dans la Sorbonne des années 1930. Néanmoins, il est troublant de voir que le début de la deuxième chaire correspond à la mort du professeur de la première et que les deux chaires sont créées et financées par les mêmes organismes. Ceci tendrait à accrédi-ter la succession plutôt que la coexistence d'autant plus que [Charle & Telkes, 1989] ne mentionne pas un autre chimiste à la chaire de « chimie des combustibles » après 1932.

institutionnel dans une entité plus vaste et mal définie encore : une proto-communauté des hautes températures.

II.3.2. Du Comité Rothschild à la Commission CNRS : essor et structuration d'une communauté (1945-1950)

Depuis 1939, mais surtout après la Deuxième Guerre mondiale, le Centre National de la Recherche Scientifique a pris le relais du mécénat privé en matière de recherche scientifique nationale [Picard, 1990, I & II]. Le Comité Rothschild, qui s'est étoffé depuis 1924, est transformée en deux « commissions CNRS » après-guerre [Lebeau, 1953 ; Mayer, 1953], lors de la création de ce nouvel outil par le CNRS (I.2.3). Deux points au moins suggèrent une rupture entre les deux nouvelles commissions du CNRS et le Comité Rothschild. Les commissions CNRS distinguent une « chimie » et une « physique des hautes températures » là où le Comité les associait. D'autre part, l'amplitude des thèmes étudiés dans les commissions est réduite par rapport au comité d'entre-deux-guerres : les réfractaires sont désormais séparés des hautes températures. La direction du CNRS donne l'impression de fragmenter le comité multidisciplinaire d'avant-guerre.

II.3.2.1. Rupture institutionnelle, continuités méthodologiques et humaines

Toutefois la rupture entre Comité Rothschild et Commission CNRS n'est qu'un trompe-l'œil documentaire. Les deux commissions « haute température » et « réfractaires », créées dans l'urgence d'après-guerre, sont rapidement fondues en une Commission des hautes températures et des réfractaires. En 1950, la Commission CNRS publie un ouvrage collectif, *Les hautes températures et leurs utilisations en chimie* [Lebeau, 1950], qui répond à un quart de siècle de distance à la première réalisation du Comité : *Fours électriques et Chimie* [Lebeau, 1924]. D'ambition plus vaste – puisqu'il élargit des fours électriques à la production de hautes températures –, le deuxième ouvrage conserve le même directeur, Lebeau, cinq collaborateurs du premier ouvrage (Damiens, Fleury, Jolibois, Picon et Ribaud) et le même esprit multidisciplinaire et appliqué. Il propose une large revue de techniques de productions et de mesures des hautes températures et précise leurs utilisations possibles en chimie. Outre la « table des constantes » fournie en annexe, les trente-quatre chapitres (trente initiaux plus quatre ajoutés juste avant publication) se répartissent comme suit : 1°/ production de hautes températures et fours (16 chapitres et 2 demi chapitres) ; 2°/ techniques de mesure et de régulation thermique (5 chapitres) ; 3°/ synthèses, études et applications à divers composés chimiques (11 chapitres et 2 demi chapitres). L'ouvrage a une double orientation physique et chimique : physique parce qu'il décrit différentes techniques de hautes températures (production et mesure), chimique parce que ces techniques servent à des synthèses dans des conditions opératoires bien définies. Contrairement à 1924, les fours électriques ne sont plus au cœur du projet et ne représentent plus qu'une catégorie de fours parmi d'autres. L'ensemble des fours couvre encore la moitié des chapitres. Ce sont les composés chimiques (des solides pour la quasi-totalité) qui investissent massivement l'ouvrage. Leur synthèse, l'étude de leurs propriétés physiques et leurs applications potentielles, en particulier réfractaires, prennent de l'importance. Associée à la synthèse, une « pyrométrie » plus performante accompagne un souci plus grand de contrôle des conditions opératoires, en particulier de la température.

Même si le projet d'édition est plus ambitieux, la Commission suit l'esprit du Comité en se plaçant entre chimie et physique, entre science et technique, entre université et industrie.¹²⁰ Que ce soit par les objectifs, les méthodes ou les acteurs, la Commission CNRS d'après-guerre se place dans la continuité du Comité Rothschild d'avant-guerre. Cette orientation vers le décloisonnement est-elle en accord avec les orientations de l'ensemble du CNRS ? Les textes de statuts stipulent que la moitié des « attributions » du CNRS consiste à développer une recherche appliquée.¹²¹ La Commission remplit cet objectif puisqu'elle s'efforce de concourir à « l'avancement de [...] l'économie nationale [...] à la demande [...] des entreprises privées ». Néanmoins, suite au régime utilitaire de Vichy, l'après-guerre est marquée par un revirement du Comité national du CNRS et par la priorité donnée à la recherche fondamentale.¹²² Joliot par exemple, refusant le dogme de la science pure, quitte la direction du CNRS pour celle du CEA, qui vient d'être créé dans un but d'application [Picard, 1990, p. 98-108]. La Commission des hautes températures et des réfractaires se trouve donc en décalage par ses objectifs et ses méthodes par rapport à la tendance majoritaire de sa direction, tournée vers les sciences pures et leur classement en disciplines. Certains observateurs étrangers constatent cette option française [OECE, 1951]. La démarche de la Commission se distingue aussi du CNRS par le choix d'une approche par problèmes – ceux posés par les problèmes concrets des hautes températures – plutôt que par « objets ». Il s'agit de fabriquer des instruments, de produire des hautes températures plutôt que d'établir des lois. Est-elle minoritaire pour la recherche française d'après-guerre ou seulement plus difficile à repérer parce qu'elle ne s'inscrit pas bien dans les grilles de lecture institutionnelle ?

II.3.2.2. Visages de la Commission au début des années cinquante

Comme pour le livre de 1924, une analyse des collaborateurs de *Les hautes températures et leurs utilisations en chimie* [Lebeau, 1950] permet de dresser une cartographie de la Commission.¹²³ Chaque collaborateur rédige soit plus d'un article, soit un article en collaboration : pour faire face à la rédaction de trente-quatre chapitres et à un bilan des constantes thermodynamiques, leur nombre passe de huit à trente-cinq. L'annexe A.II.4 propose une classification de tous les collaborateurs soit par famille scientifique s'il s'agit des « chimistes »¹²⁴, soit par disciplines pour les autres. Cette synthèse répertorie un certain

¹²⁰ La commission doit assurer une « collaboration étroite [...] entre tous les chercheurs, chimistes, physiciens ou techniciens. » Le but de cette collaboration est désormais de « préciser les problèmes les plus urgents à résoudre et fournir les directives susceptibles de conduire à des solutions satisfaisantes. » Pour ce faire, elle cherche à « grouper des représentants qualifiés de la Science et de l'Industrie décidés à unir leurs compétences spéciales pour assurer la bonne exécution d'une œuvre commune. » [Lebeau, 1950, introduction].

¹²¹ « Le Centre National de la Recherche Scientifique [...] est notamment chargé : 1. D'effectuer ou de faire effectuer, soit de sa propre initiative, soit à la demande des services publics ou des entreprises privées, les études et recherches présentant pour l'avancement de la science ou l'économie nationale un intérêt reconnu » [CNRS, 1947, p. 4].

¹²² En 1948, la ligne officielle du CNRS est mise en évidence par cette déclaration en séance plénière du Comité national : « il n'y a pas de science appliquée, mais seulement des applications de la science » [CNRS, 1948, p. 16].

¹²³ L'introduction du traité, signée par Lebeau – rédigée grâce aux renseignements fournis par les collaborateurs eux-mêmes ? –, détaille le *curriculum vitae* de chacun. Malgré une tendance prononcée pour l'hagiographie, elle constitue un document précieux sur les participants actifs de la Commission puisqu'elle détaille de manière vivante la carrière des personnages mentionnés et les replace dans leur environnement familial. La plupart des renseignements qui suivent et dont l'origine n'est pas explicitement spécifiée viennent de cette source.

¹²⁴ L'appellation « chimiste » n'est pas rigoureuse dans la mesure où certains des héritiers des trois maîtres sont métallurgistes ou inventeurs (comme Chevenard ou Dupuy) mais elle a pour but de regrouper les collaborateurs de manière générique suivant le concept de « famille scientifique ».

nombre d'informations (filiations, dates de thèse, profession, chapitres rédigés), que je synthétise ci-dessous.

La famille Moissan, qui constituait le cœur du Comité, demeure influente (avec sept collaborateurs dont le directeur et trois membres du premier traité) mais n'est plus majoritaire en nombre puisque les héritiers de Le Chatelier ont investi la Commission (neuf nouveaux membres en comptant Chevenard). De plus, trois descendants d'Urbain participent activement au traité en rédigeant près du quart des chapitres (neuf sur trente-cinq) et en fournissant le « secrétaire général » du traité (Trombe). Si la famille Moissan conserve un noyau dur de collaborateurs au sein de la Commission, les deux autres familles de chimistes viennent contrebalancer sa toute puissance initiale. Les trois principales composantes chimiques de la proto-communauté des années 1920 (II.3.1.2) se retrouvent donc au sein de la Commission. Au moment où le CNRS prend la main, le groupe initial s'est considérablement agrandi. Vingt-cinq ans de construction progressive de la recherche nationale ont réuni en une même commission trois traditions qui s'ignoraient au début des années vingt. Si les familles Moissan et Urbain présentent exclusivement des universitaires, les héritiers de Le Chatelier se partagent à parts égales entre industrie (quatre) et académie (cinq), mettant ainsi en pratique les enseignements du maître : universitaires, chimistes, ils se tournent vers les applications et l'instrumentation ; industriels, métallurgistes, leurs recherches sont suffisamment fondamentales pour avoir une contribution à un ouvrage financé par le CNRS et enseigner en école d'ingénieurs. Ceci vient renforcer les assertions de Letté [2004, p. 7, 191] précisant que Le Chatelier n'est pas un « savant mythique » de la III^e République (comme Urbain ou Moissan), et que « le sentiment d'une œuvre éparse, voire inachevée, domine » (entre chimie et métallurgie, science et technique, académie et industrie) mais il « a constitué autour de lui une équipe significative de disciples pour prétendre au titre d'école. ». Les ferments de science nouvelle qu'il a semés poussent désormais au sein de la Commission des hautes températures du CNRS. La *Chaudronnerie* en particulier y joue un rôle important (quatre membres et cinq articles).

Le classement par familles scientifiques simplifie la physionomie de la Commission mais n'épuise pas tous ses traits. Outre les familles de chimistes (qui regroupent dix-neuf des trente-cinq collaborateurs), les autres rédacteurs sont des personnalités éminentes de la communauté scientifique, éventuellement associés à un de leurs collaborateurs. Deux physiciens qui ont participé au Comité sont toujours présents : Ribaud, ponté des hautes températures à la Sorbonne, qui a imposé deux de ses anciens élèves, et Fleury devenu en 1940 directeur de l'« Institut d'Optique théorique et appliquée » prenant la suite de Charles Fabry. Pour les autres, on trouve soit des universitaires : trois minéralogistes (dont deux professeurs de la Sorbonne), un électrochimiste ; soit des industriels : trois verriers, un électronicien, un géophysicien ; soit des enseignants des écoles d'ingénieurs et conseillers de l'industrie : trois céramistes.

Cette double structure, à la fois disciplinaire et familiale, met en évidence plusieurs caractéristiques de la Commission. Sa force institutionnelle est frappante : six membres de l'Institut, onze professeurs d'université, quatre directeurs de laboratoires, un doyen d'université, deux directeurs d'école d'ingénieurs, deux membres du directoire du CNRS, onze membres du Comité national du CNRS. Les industriels impliqués occupent aussi des positions de direction : directeurs généraux (2), scientifique (1), de laboratoire (2), de recherche (4). Une telle puissance sociale dans une Commission de recherche appliquée bat en brèche les images d'Épinal sur la domination sans partage de la science pure en France. Elle relativise aussi des analyses déplorant le manque de relations efficaces entre industrie et université du type [OECE, 1951]. En revanche – et c'est le deuxième point – elle met en

évidence une nette prédominance des univers parisiens et masculins. Les trajectoires professionnelles des collaborateurs plus âgés confirment la nécessité d'un aller-retour Paris-province pour grimper l'échelle sociale durant la première moitié du vingtième siècle : les universitaires les plus titrés ont des postes à Paris après être passés en province.¹²⁵ Puissance institutionnelle rime donc bien avec centralisme jacobin. De plus, la Commission est composée par des hommes : une seule femme sur trente-cinq collaborateurs, Louise Halm, qui plus est correspond à la deuxième génération (la moins influente). Troisièmement, la Commission présente une pluralité disciplinaire. Certes, c'est la « chimie minérale » qui domine le cœur du groupe¹²⁶ mais la variété et le nombre de disciplines représentées sont impressionnants : céramiques, électrochimie, électronique, géologie, géophysique, hautes températures, instrumentation, métallurgie, minéralogie, optique, thermodynamique, verres. À ce foisonnement disciplinaire correspond une diversité des formations : ICP (6 collaborateurs), universités (>5), parisienne, lyonnaise ou grenobloise, ENS (4), Polytechnique (3), faculté de Pharmacie (3), ESPCI (2), École supérieure d'électricité (2), Mines de Paris (1), de Saint-Étienne (1), ICL (1), CNAM (1), École d'agronomie (1), École supérieure de soudure autogène (1). Quatrièmement, la constellation disciplinaire, tant par les formations que par les carrières, s'accompagne d'une ouverture vers l'industrie : plus du tiers des collaborateurs (douze) y occupent un poste à temps plein, certains universitaires y sont conseillers techniques.¹²⁷ Cinquième point : la Commission présente une forte cohésion

¹²⁵ L'exemple de Chaudron a été traité en détails (II.2). À Lille, il retrouve Fleury qui occupe la chaire d'optique (1928-36) après une thèse à la rue d'Ulm. Celui-ci devient par la suite professeur de « Physique générale dans ses rapports avec l'industrie » au Conservatoire des Arts et Métiers [Fontanon & Grelon, 1994]. Le parallèle entre les parcours de Ribaud et Hackspill est évident : diplômés peu après 1900, ils sont incorporés durant la Première Guerre mondiale avant d'être nommés en 1919 à la faculté des sciences de Strasbourg (à nouveau française) où chacun restera une douzaine d'années. Ce n'est qu'ensuite qu'ils obtiennent un poste de professeur à la Sorbonne. Ce mouvement n'est pas propre aux sciences physiques puisque, par exemple, Marc Bloch suit le même chemin [Bloch, 1990]. À la génération suivante, le parcours est similaire : Bénard est d'abord nommé maître de conférences à Lyon (1947) avant de pouvoir revenir à Paris (1951). Après sa thèse, Cueilleron quitte le laboratoire Hackspill (1946) pour devenir professeur à l'École de chimie de Mulhouse [Lebeau, 1950].

¹²⁶ Parmi les onze collaborateurs qui appartiennent au Comité national du CNRS, sept sont des minéralistes : pour la section II de chimie, « chimie minérale », on trouve : « Chevenard, Chrétien, Lebeau, Pâris, Andrieux, Bénard, Chaudron, Grillot, Hackspill, Job, Loriers, Trombe » (c'est moi qui souligne). Si l'y on ajoute Loriers, élève de Trombe, les deux tiers du comité de chimie minérale du CNRS appartiennent à la Commission des hautes températures [CNRS, 1949c, p. 145]. D'autre part, les trois familles (Le Chatelier, Moissan, Urbain), qui regroupent dix-neuf collaborateurs, ont un large socle de chimie minérale.

¹²⁷ Certains sont métallurgistes. Ainsi Dupuy, après une thèse avec Le Chatelier, fait toute sa carrière à la « Compagnie des Forges de Châtillon-Commentry et Neuves-Maisons » (1910-46) avant de devenir « Directeur du Bureau de Normalisation de la Sidérurgie ». Chevenard, ancien collaborateur de Le Chatelier, est « administrateur de la Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville » dans laquelle Waché, ancien élève de Chaudron, travaille comme directeur de la recherche. Ces deux entreprises participent au mouvement de formation de la métallurgie physique depuis le dix-neuvième siècle [Chezeau, 2004, chapitre III]. D'autres sont ingénieurs des hautes températures : Oswald est « directeur scientifique de la Société Le Carbone-Lorraine », qui fabrique des fours à arc électrique ; en électronique : Descarsin, ingénieur de l'armement, est « directeur actuel du Service « Etudes et Recherche » [du Département « Radio » de] la Compagnie des Lampes » et conseiller de « la Compagnie française Thomson-Houston » ; ou pour les verres : George, fondateur des sociétés verrières « Quartz et Silice » (1922) et « Prosilis » (1946) dans lesquelles travaille Bouchet, ingénieur de l'armement (1936-37), est ingénieur-conseil de Saint-Gobain. Bernard Long, normalien, y a travaillé comme directeur du « service des Recherches des Glaceries » (1923-44) avant de diriger « l'Institut du Verre » (1944) où il est remplacé l'année suivante par Psychès, ancien élève de Ribaud. En céramique, Letort a été maître de conférences à l'École centrale avant de diriger le Centre National d'Etudes et de Recherches Céramiques. Sa collaboratrice, Louise Halm, seule femme de la « commission » et ancienne élève de Léon Guillet au CNAM (qui fut l'ami de Le Chatelier), dirige le Laboratoire central de l'Union française des Produits réfractaires (LCUFPR) tout en étant conseillère au Service technique de l'Aéronautique. Enfin, Maillet, polytechnicien du corps des Mines, travaille à la Compagnie générale de Géophysique (1931-42) avant de gérer la Société de

interne grâce aux multiples passerelles entre groupes et entre individus. Voici comment : les professeurs d'université et des écoles d'ingénieurs forment en cours ou en thèse les futurs dirigeants des industries qui n'oublient pas leur maître. Les éditeurs de revue (francophone) connaissent les chercheurs qui publient chez eux.¹²⁸ Les institutions offrent des moyens de se connaître : s'affronter ou se soutenir (commissions du CNRS), voire se liquer en véritables confréries (écoles et Institut).¹²⁹ Les sociétés savantes sont génératrices de liens communautaires exaltant le groupe et ses caractéristiques communes.¹³⁰ L'organisation de séminaires, colloques, congrès est l'occasion de rencontres informelles et de présentations officielles.¹³¹ Certaines circonstances dramatiques peuvent bouleverser les réseaux préexistants et mettre en relation des individus qui ne se connaissaient pas. En particulier, la participation aux efforts (scientifiques) de guerre a aussi pu établir des contacts inédits dans les laboratoires de l'armement.¹³² Enfin, sixième et dernier trait caractéristique : la Commission montre des velléités d'ouverture vers l'étranger. À titre individuel d'abord, lors de leur formation,¹³³ les collaborateurs sont ensuite incités et financés par le CNRS pour partir à l'étranger.¹³⁴ Quelques-uns seulement des grands patrons sont membres de sociétés

Recherche et d'Entreprises industrielles (1943-) [Lebeau, 1950]. Chaudron au moins est conseiller technique du CEA depuis 1950 [Chaudron, 1954].

¹²⁸ En 1950, Dupuy est président directeur général de la *Revue de Métallurgie*, fondée par son maître Le Chatelier, à laquelle contribuent pour cette seule année Chaudron et ses anciens élèves, Bénard, Moreau, Hérenguel et Herzog mais aussi Chevenard et Wyart. Durant sa carrière, il associa son emploi dans l'industrie sidérurgique (1910-46) à des enseignements de « Métallurgie générale » (1926-31) et de « Sidérurgie » (1940-46) à l'École des Mines (fief de son maître Le Chatelier puis de Jolibois).

¹²⁹ Les diverses assemblées du CNRS, en particulier le Comité national, sont des lieux typiques d'affrontements entre familles rivales et de cooptations au sein d'une même famille ou d'un même groupe d'intérêt. Par exemple, Jolibois devient « Président du Comité directeur » du LCTC dirigé par Chaudron [Cornet, 1990, p.9]. Les écoles d'ingénieur (pour les débuts de carrière) et l'Institut (pour les fins) sont des institutions favorisant la formation de réseaux de relations qui peuvent parfois s'apparenter à de véritables confréries. En 1950, six membres de la Commission des hautes températures sont à l'Académie des sciences : Hackspill, Jolibois, Lebeau (tous les trois en chimie), Michel-Levy (minéralogie), Ribaud (physique générale), Chevenard (application de la science à l'industrie). Trombe, Foëx et Berton sont diplômés de l'ICP durant la direction de l'École par leur maître de thèse, Urbain. Ensuite, le Laboratoire des terres rares, installé à l'ICP, est soutenu par le directeur suivant : Hackspill.

¹³⁰ Jolibois est membre de la Société d'encouragement pour l'Industrie nationale dont sont médaillés Chaudron, Laffitte et Bénard. Nombreux sont les membres de la Société chimique de France dont ont été présidents Urbain (1926-28), Jolibois (1935-37), Hackspill (1946), Lebeau (président d'honneur en 1951), Chaudron (1953-54), Laffitte (1961-62), Bénard (1967-68).

¹³¹ L'exemple d'Andrieux met en évidence le nombre important de réunions publiques auxquelles peuvent intervenir certains universitaires et de sociétés savantes auxquelles ils peuvent prendre part : « M. Andrieux a participé activement aux divers Congrès de Chimie industrielle, à ceux de l'Association française pour l'Avancement des Sciences, et aussi au Congrès international des Mines, de la Métallurgie et de la Géologie appliquée (Paris, 1935). La Société Chimique de France lui attribue en 1929, le prix Ancel. L'Académie des Sciences lui décerne le prix Cahours en 1930, le prix Marguerite de la Charlonie et la Médaille Berthelot en 1946. Membre du Conseil supérieur de la Recherche scientifique depuis 1939, Vice-Président de la Société française de Métallurgie (1946), il est également Membre du Comité consultatif des Universités. » [Lebeau, 1950, p. XVI, XVII].

¹³² Lebeau et Jolibois collaborent à l'effort de guerre en 1917 dans les laboratoires de l'armement où travaille H. Muraour depuis 1914.

¹³³ Par exemple, en sortant de l'ICP et avant sa thèse, Berton passe deux ans à Londres (1935-37) au laboratoire Bragg (fils) comme *Ramsay fellow* à l'Institut de technologie et à la *Royal Institution* [Lebeau, 1950, p. XXVIII]. Hackspill, Jolibois et Wyart participent à la « reprise de contact du Bureau, du Conseil et des Commissions de l'Union Internationale de Chimie [qui] s'est tenue à Londres du 24 au 27 juillet 1946 » sans l'Allemagne mais avec l'URSS [BSCF, 1946]. Bénard est secrétaire de la division chimie minérale de l'IUPAC en 1950 [Bénard, 1968].

¹³⁴ Cette incitation correspond à une directive générale : « Il est indispensable que des chercheurs français aillent pour un temps séjourner des laboratoires, des bibliothèques ou des musées étrangers... » [CNRS, 1948, p. 21] mais elle est mise à profit par les membres de la Commission pour séjourner à l'étranger : Bénard reçoit 44.000

européennes.¹³⁵ Les industriels participent aussi au décloisonnement de l'espace national.¹³⁶ À titre collectif aussi, l'ouverture internationale se manifeste par un regard sur les conférences étrangères.¹³⁷

En conclusion, près d'un quart de siècle écoulé a permis la mue du Comité Rothschild de 1924 en une Commission CNRS atypique. Les objectifs, quoique plus ambitieux, conservent les mêmes impératifs transfrontaliers : multidisciplinarité, métissage université-industrie, problèmes appliqués. La question centrale, toujours renouvelée – comment produire et utiliser les hautes températures en chimie ? –, place un objet technique – le four – au cœur des débats. Cette association entre un problème et instrument permet et exige la très grande perméabilité des univers entre eux, cloisonnés ailleurs mais dialoguant ici : l'Université avec l'appliqué, l'industrie à l'écoute du cognitif. Entre chimie minérale et métallurgie, optique et sidérurgie, électronique et minéralogie, thermodynamique et cristallographie, céramique et verres, une multitude de couples désunis par les cloisonnements historiques entame une valse aux disciplines. La Commission présente non plus l'aspect d'un comité *ad hoc* mais plutôt celui d'un groupe plus dense, traversé de relations individuelles, animé de pressions collectives (familles, commissions, sociétés savantes, industries). Est-ce à dire que la Commission incarne désormais une communauté nationale des hautes températures qui s'articulerait autour d'elle ? Cinq points appuient cette thèse : un vaste élargissement du tissu techno-scientifique (du gaz au solide, des fours à la pyrométrie, de la synthèse aux propriétés) ; un espace interne durablement structuré par des groupes (familles, entreprises) et des réseaux de liens entre les individus ; une puissance et un prestige institutionnels couvrant un vaste territoire de l'Université à l'industrie ; un regard jeté au-delà des murs nationaux (particulièrement sur l'espace européen) ; un travail remarqué bien au-delà de l'horizon de la Commission (entre autre par un physicien comme Rocard).¹³⁸

francs en 1947 pour un « voyage et séjour en Suède pendant 5 semaines » ; Wyart reçoit 10.000 francs en 1945 pour « frais de mission en Angleterre, invitation de la Sté franco-anglaise des sciences », 6.000 en 1946 pour un « voyage Paris-Londres et retour afin d'assister au congrès du « *X ray analysis group* » de l'*Institute of physics*, en 1947, 12.000F « voyage et séjour à Berne du 25 au 29-8-47 afin d'assister à la 17^e conférence internationale de la Fédération internationale de documentation. » [CNRS, 1949a, p. 376-481].

¹³⁵ Outre Chaudron, Jolibois a probablement la plus grande influence à l'étranger : il a reçu « la plus haute distinction dont dispose [la Société Chimique de Berlin] : la médaille von Hoffmann. Il est également membre correspondant de l'Académie des Sciences techniques de Varsovie et membre d'honneur des sociétés chimiques suisses et polonaises ». Viennent ensuite Hackspill, lui-aussi « membre correspondant de l'Académie de Varsovie et de la Société polonaise de Chimie », et Chevenard « membre honoraire de l'*Institute of Metals* » à Londres. Wyart est « membre du Bureau exécutif de l'Union internationale de Cristallographie » [Lebeau, 1950]. Laffitte aurait été tellement tourné vers les États-Unis qu'il y aurait « puisé » une bonne part de son inspiration : « Laffitte avait la chaire de chimie générale et puisait généreusement pour son cours dans des livres américains, comme on l'a découvert plus tard. » [I Caro, 2002, p. 4].

¹³⁶ Descarsin a fait quelques conférences à l'étranger « sur le chauffage industriel par haute fréquence [...] au Congrès de Haute Fréquence Industrielle de Zurich (1946), [...] et] au Congrès National des Industries Thermiques à Rome 1949 ». Long, membre de l'*English Society of Glass technology*, participe à l'« *International Commission of glass* » (organisme international qui a l'ambition de réunir les professionnels du verre, industriels et universitaires), dont le président, verrier anglo-saxon, W.E.S. Turner, écrit que le nom de Long « *is widely known outside of his country* » [Bulletin de l'Institut du Verre, mars 1946, p. 2]. Les travaux de Muraour dans le domaine des poudres a conduit à mettre au point une « source lumineuse puissante et brève [qui] est aujourd'hui utilisée en Angleterre et aux États-Unis. » [Lebeau, 1950].

¹³⁷ Letort « a été, à plusieurs reprises, chargé de missions officielles à l'étranger, notamment aux États-Unis [au retour desquelles] il a fait bénéficier notre Comité des Hautes Températures de son érudition à la fois scientifique et technique fort appréciée. » [Lebeau, 1950].

¹³⁸ Rocard qui fait le compte rendu des ouvrages pour la *Revue scientifique* (à dominante physique) écrit à propos de l'ouvrage de 1950 : « Véritable encyclopédie des hautes températures en chimie. L'ouvrage est « multivalent ». On y trouve aussi bien de remarquables développements théoriques, que des mises au point technologiques, des exposés riches en documentation, avec une bibliographie toujours complète et moderne. La

Néanmoins, l'idée d'une Commission structurant une communauté autour d'elle appelle des nuances. Au niveau techno-scientifique, la balance penche clairement du côté de la chimie : il serait sans doute plus précis de parler de communauté de la « chimie des hautes températures ». Existe-t-il un pendant de la physique des hautes températures ? Qu'en est-il d'une supra-communauté des « hautes températures » ? En interne, le repérage des rouages est limité en regard du nombre quasi illimité des contacts possibles couvrant tout le spectre des passions humaines. Or, ce sont aussi ces rencontres informelles – tues par les documents officiels – qui font le sel de la vie d'une communauté et qui démultiplient les possibles relations entre les individus. Si l'on considère que les liens qui comptent sont ceux qui ont laissé des traces – ce qui n'est pas vrai –, il s'agirait pour rendre compte de la structure dynamique et de la vie interne de la communauté d'étudier systématiquement des sources plus précises : échanges de lettres, documents internes des sociétés savantes, de l'organisation des colloques, photographies, souvenirs... Assimiler la communauté à un « groupe » institutionnel repérable évite cet effort long et fastidieux puisque la définition du groupe présuppose cette opacité comme non problématique pour l'intelligibilité globale. La simplification tient tant que l'hypothèse est acceptée. Quelques lézardes fendillent la figure de la communauté. Celle-ci ne comporte qu'une seule femme, dans la deuxième génération, celle des élèves, ce qui est très peu comparé au taux féminin dans les sciences après-guerre (entre 10 et 20% pour les écoles d'ingénieur (I.2.2)). En interne encore, les documents officiels s'appesantissent sur les échanges cordiaux : où sont les rigidités hiérarchiques, les dominations mandarinales, les guerres familiales ? Où sont les techniciens des laboratoires alors qu'il s'agit d'instrumentation ? La communauté des hautes températures se construit aussi sur toutes ces luttes sociales entre groupes d'intérêt, de « sang », de classes.¹³⁹ Les grandes familles scientifiques tentent d'imposer leur mainmise sur les diverses instances directrices pour une lutte de pouvoir et de prestige. Comment autant de patrons aussi puissants cohabitent-ils au sein d'une Commission aussi petite ? C'est sans doute une erreur d'avoir voulu ajouter linéairement les titres de chacun : ne faut-il pas soustraire parfois (pour rendre compte des oppositions, des tensions) ou multiplier (par des effets de groupe de pression) ? Au niveau des générations, la conception familiale ne résout pas tout. Si certains élèves de Chaudron sont au garde-à-vous et déplie le tapis rouge quand le patron entre au LCTC, d'autres peuvent s'émanciper, voire se révolter. Disparaissent-ils alors de la Commission sans disparaître de la communauté ? Que dire encore des nouveaux venus par rapport aux maîtres qui ne sont pas les leurs ? Comment se jouent les passations de pouvoir entre les générations ? La Commission est aussi un terrain de guerres générationnelles. Trombe par exemple, libéré de la présence de son maître (qui ne lui fait pas d'ombre mais ne le protège plus), se trouve chef de famille et secrétaire général de l'ouvrage mais n'apparaît comme un des maîtres de la communauté – lui n'a pas droit aux épithètes ronflants par Lebeau [1950] –. Plus jeune, ayant raté son baccalauréat, il est plutôt celui qui bouscule l'ordre établi des anciens par son caractère de *condottiere* et les circonstances de sa libération (libéré des geôles par la fin de la guerre et de son mentor, il se trouve à la tête du Laboratoire Urbain à l'ICP).¹⁴⁰ En externe,

plupart des auteurs sont des maîtres dans leur domaine, et nous donnent des mises au point hautement qualifiées. La diversité du contenu nous oblige à tout passer en revue. » Même s'il termine sur un constat plus mitigé pour la physique : « Il est difficile de juger le livre : beaucoup de descriptions, beaucoup de données, qui seront fort utiles, beaucoup de chimie, moins de physique. »

¹³⁹ Le « sang » fait bien sûr référence ici aux familles scientifiques. Les oppositions internes entre groupes rivaux s'accompagne semble-t-il d'une solidarité externe lorsque les membres ne sont pas en compétition comme le montre cet exemple déjà évoqué (II.2.1.4), fourni par [Cornet, 1990, p. 3] : « Ce dernier [Chaudron] est encouragé à se présenter par le Professeur Lebeau [à la succession d'Urbain au Laboratoire Central des Traitements Chimiques] contre Gault, un chimiste organicien »

¹⁴⁰ « avant mon arrivée (1955), il y a eu une sorte de révolution de palais à Paris. Une scission dans la communauté scientifique française entre ceux qui, comme André Chrétien ou Paul Laffitte, ont occupé les

l'influence étrangère de la Commission est difficile à préciser. Et si par hasard, la Commission n'était pas un phare (qui rayonne) mais un puits (qui copie) au niveau international, perdrait-elle son statut communautaire ? Sans doute, oui mais si cette éventualité se réalisait, la représentation de la communauté par la Commission s'en trouverait affaiblie puisque que la France (au moins au travers d'individus et d'autres institutions) existe sur la scène internationale des hautes températures.

C'est sur cette ambiguïté entre un groupe institutionnel et une communauté que se clôt cette évocation du champ des hautes températures. La Commission a certes beaucoup changé depuis vingt cinq ans, a cru et s'est organisée mais il est encore trop tôt pour savoir si elle peut structurer à sa périphérie une communauté de chercheurs sur les hautes températures. Elle reparaitra par la suite, en filigrane lorsque de l'émergence de la communauté de chimie du solide (chapitre III) ou l'évocation des laboratoires types de cette communauté (chapitre IV). Mais c'est surtout au chapitre V qu'elle reviendra pour décider si elle peut prétendre au statut de communauté des hautes températures ou pas.

II.4. Les « réactions dans l'état solide » : un réseau européen vers 1950

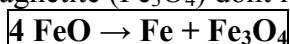
« L'activité chimique entre corps solides fut pendant longtemps un phénomène presque inconcevable pour les chimistes. » [Chaudron & Bénard, 1949]. Dès la fin des années 1930 néanmoins, les cristallographes commencent à s'intéresser plus sérieusement à la dynamique des solides (I.3.2). Une activité se développe à l'échelle européenne. En chimie, l'école suédoise menée par J. Arvid Hedvall à Göteborg s'y illustre particulièrement par le nombre et la pertinence de ses recherches expérimentales. En 1938, Hedvall publie en langue allemande un ouvrage *Reaktionsfähigkeit fester Stoffe* [Hedvall, 1938] inventoriant les nouveaux résultats expérimentaux sur les « réactions de l'état solide ». La même année, la conférence organisée par la *Faraday Society*, intitulée « *Chemical Reactions involving Solids* », rassemble à Bristol physiciens, cristallographes et chimistes autour de cette même question. Les physiciens essaient de trouver des lois générales à ces réactions. Ainsi J. D. Bernal « proposa une théorie structurale des réactions dans l'état solide [Bernal, 1938], qui devait s'avérer par la suite très féconde » [Chaudron & Bénard, 1949]. La fin des années trente voit donc se développer en Europe un intérêt grandissant pour les comportements dynamiques des solides. Aux côtés des cristallographes et des physiciens, les chimistes y prennent part. En France aussi.

II.4.1. Du foisonnement expérimental à l'impératif de classification : exemple du travail de Jacques Bénard (1933-1946)

Entre voix théorique et expérimentale, les chimistes français ont déjà choisi : ce sera la voie expérimentale. C'est Hedvall, le Suédois expérimentateur – et non pas Bernal le

chaires de la Sorbonne et d'autres qui furent éloignés et durent émigrer à Bellevue. [...] Là on a envoyé un certain nombre de laboratoires de recherche plutôt encombrants, demandant de l'espace mais aussi dirigés par des personnages plutôt hauts en couleurs. Dans le lot, il y avait Trombe, Boris Vodar (spécialiste des hautes pressions), Claude Bonnemay un électrochimiste, et aussi Aimé Cotton. » (I Caro, 2002, p4). « C'était un *condottiere* Trombe, un aventurier, un gentilhomme. » (I Caro, 2005, p11)

Britannique théoricien – qui est considéré comme « le fondateur de la Chimie des réactions entre solides » dans le *Bulletin de la Société chimique de France* [BSCF, 1952].¹⁴¹ Au niveau national, le domaine est largement dominé par la *Chaudronnerie*. En son sein, c'est la thèse de Jacques Bénard [Bénard, 1939] qui présente la vision la plus innovante des années trente. Elle porte sur l'« Étude de la décomposition du protoxyde de fer et de ses solutions solides » (1933-1939). Elle traduit évidemment un intérêt de Chaudron pour ce domaine. À Lille, Bénard, fraîchement sorti de son école d'ingénieur, se voit confier par le maître l'étude de la réaction de décomposition à l'état solide, au-dessous de 570°C et à pression ambiante, du protoxyde de fer (FeO) en fer (Fe) et magnétite (Fe₃O₄) dont l'équation bilan est :



Dans l'introduction, Bénard s'assigne cinq objectifs (qui correspondent aux cinq chapitres) : 1/ « détermination des paramètres cristallins » (distances entre atomes) du protoxyde de fer (p. 4-10) ; 2/ « influence sur la structure de la composition du composé et des paramètres de synthèse » (p. 11-24) ; 3/ « étude cinétique » de la réaction (p. 25-44) ; 4/ « étude de la stabilité des solutions solides dans le protoxyde de fer » (p. 45-63) ; 5/ « étude des réactions de substitution dans la magnétite » (p. 64-87). L'étude cinétique en tant que telle (chapitre 3) n'occupe qu'un quart de la thèse. Au cours de la réaction de décomposition, la structure des composés évolue : on passe de la structure du protoxyde de fer à celles du fer et de la magnétite. Il s'agit de suivre cette évolution au cours du temps. Pour figer la réaction à un moment donné, le thésard réalise une trempe* du mélange réactionnel puis il peut procéder à une analyse des réactifs par diffraction des rayons X sur poudres. L'étude de la réaction le conduit à se préoccuper d'autres questions : synthèse chimique (substitution partielle du protoxyde de fer par des monoxydes de cobalt, nickel, magnésium ou manganèse), propriétés thermodynamiques (stabilité des nouveaux composés par analyse thermique différentielle pour tracer des diagrammes de phases) et thermomagnétiques (nouvelles propriétés magnétiques des « magnétites substituées »), concepts métallurgiques (transposer la notion des « solutions solides » à la compréhension des oxydes). La principale conclusion (p. 89) souligne une permanence structurale lors des réactions de décomposition et de substitution du protoxyde de fer par des oxydes métalliques : malgré la mobilité des ions métalliques bivalents (Fe²⁺ ou M²⁺) par diffusion, il n'y a pas changement du type cristallin, le réseau d'oxygène reste stable, seule la distance entre atomes peut éventuellement varier. Les propriétés chimiques (réactionnelles) modifient peu la structure cristalline.

Encore rare durant les années trente, ce type d'études cinétiques explose après-guerre : le foisonnement des résultats expérimentaux menace alors la clarté des réactions dans l'état solide. Les chimistes cherchent alors à subsumer les cas concrets sous des comportements généraux.¹⁴² En janvier 1946, Bénard présente devant la Société chimique de France un « exposé d'actualité » intitulé « La structure cristalline. Facteur des réactions dans l'état solide ». Il commence par justifier son intervention : après une période de grande activité expérimentale – mise en évidence par la bibliographie qu'il fournit et qui comporte près de trente-cinq citations –, « nous avons pensé que le moment était venu de coordonner ces faits expérimentaux et de rechercher dans quelle mesure ils peuvent se rattacher à des lois générales. » [Bénard, 1946, p. 511]. Son exposé vise à préciser comment les phénomènes

¹⁴¹ Bien que la notice [BSCF, 1952] ne soit pas signée, il est fort probable que ce soit Chaudron ou Bénard qui l'ai écrite, reconnaissant ainsi sa dette aux résultats expérimentaux de l'école suédoise.

¹⁴² Bénard [1946, p. 511] cite explicitement deux travaux de « généralisation » qui ont précédé le sien : la conférence de Parravano sur « la formation des oxydes » au Congrès du Palais de la Découverte à Paris en 1937 (à laquelle il peut avoir assisté) [Parravano, 1938] et l'article de Bernal [1938] (il cite la publication et non pas la présentation orale à la *Faraday Society* à laquelle il n'a probablement pas assisté).

chimiques (caractéristiques des réactions entre solides) dépendent de l'organisation géométrique des atomes. En d'autres termes, l'auteur voudrait expliciter des relations entre structure cristalline et propriétés chimiques d'un composé solide. Tour à tour, il traite des liens entre anisotropie et vitesse de diffusion, direction de croissance et ordre géométrique, mais aussi réactions ne s'accompagnant d'aucun changement de structure cristalline (comme dans sa thèse). Pour finir Bénard tente une synthèse personnelle (pas de référence bibliographique ici) de « classification des transformations dans l'état solide » dont je reproduis le tableau ci-dessous :

Nature de la transformation	Structure	Nature des ions	Exemples
Réaction chimique caractéristique	transformée	changés	$4 \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}$ $3 \text{FeO} + \text{CoO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Co}$
Réaction avec conservation de certains éléments de structure	partiellement transformée	partiellement changés	$2 \text{Cu} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Cu}_2\text{O}_{\text{orienté}}$ sur Cu
Réaction de substitution	identique	partiellement changés	$\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{FeO} + \text{MgO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3.\text{MgO} + \text{FeO}$
Formation des solutions solides de substitution	identique	identiques et réorganisés à grande distance	$\text{NiO} + \text{CoO} \rightarrow (\text{Ni}_4\text{Co})\text{O}$
Transformation ordre-désordre	identique ou voisine	identiques et réorganisés à petite distance	$(\text{Au}, \text{Cu})_{\text{désordonné}} \leftrightarrow (\text{Au}, \text{Cu})_{\text{ordonné}}$

La classification est construite par la variation des deux facteurs qui définissent une « phase solide cristallisée » : les « caractères géométriques du réseau » et la « nature des ions qui occupent les nœuds du réseau ». Le tableau correspond « à des modifications d'importance décroissante » de ces deux facteurs mais continues. Par analogie avec l'inertie chimique, Bénard forge « la notion d'inertie géométrique » qu'il ne définit pas précisément mais dont il explique le sens. Les énergies macroscopiques initiale et finale ne suffisent pas à caractériser une réaction dans l'état solide parce qu'elles ne prennent pas en compte les énergies microscopiques de migration des ions au sein du réseau (qu'il appelle « *énergie de mutation* » associé à des « états transitoires ») qui sont déterminantes dans les phases solides contrairement aux liquides et gaz. Or cette « énergie de mutation » est reliée « aux propriétés du réseau et des ions qui la constituent ». Qualitativement, il semble que les résultats expérimentaux aillent dans le même sens que les propriétés physiques microscopiques : « l'énergie de mutation [...] est d'autant plus faible que le nombre des ions déplacés est moindre, la distance à parcourir par ces ions dans le réseau moins grande, leur charge plus élevée et leur volume plus grand ».

Cette conceptualisation théorique et le besoin d'ordonner les cas expérimentaux marquent une profonde évolution des conceptions de Bénard depuis sa thèse et une maturité scientifique impressionnante. Alors qu'en 1939 il concluait sur la stabilité structurale du réseau d'oxygène lors de réactions particulières, il présente ici une vision plus synthétique de la chose. En effet, son système de classification permet de ranger sous deux types les réactions qu'il étudiaient lors de sa thèse : décomposition du protoxyde (qu'il appelle « caractéristique ») et « substitution » du protoxyde par des monoxydes métalliques. Plus important encore, il incorpore en un même ensemble cohérent les préoccupations des minéralistes (synthèse de composés minéraux), des cristallographes (croissance cristalline, « épitaxie », « topochimie »), des physiciens (« transition ordre-désordre ») et des métallurgistes (oxydation de la surface des métaux). Il est étonnant de voir qu'à travers la question des « réactions dans l'état solide », Bénard élabore un système de pensée (basé sur seulement deux variables) permettant d'envisager l'ensemble des composés solides non organiques dans une perspective dynamique (réaction chimique) et sous les facettes surfacique et volumique. Ce n'est pas tout : il affirme désormais sans ambages l'existence de liens forts entre propriétés chimiques et structure cristalline. Pour les expliciter mieux, il conceptualise l'« énergie de mutation » qui qualitativement rend compte des résultats expérimentaux par des considérations microscopiques dynamiques (migration des ions dans un champ de force physique). Il envisage même de quantifier ces liens « en reliant l'énergie de mutation des transformations à des grandeurs connues telles que l'énergie réticulaire des

réseaux participants, et les chaleurs d'activation correspondant à la migration des différentes ions qui sont supposés diffuser isolément. » Quel chemin parcouru depuis 1939 ! Même s'il exprime sa « reconnaissance » envers Chaudron pour ses « conseils précieux » (p. 520), Bénard montre ici une originalité scientifique et une clarté pédagogique remarquables.¹⁴³

Évidemment, cette évolution qui conduit d'une considération structurale figée à une conceptualisation microscopique et dynamique et une synthèse structurale n'est pas l'œuvre d'un seul. Ses condisciples y ont joué pour beaucoup : Forestier, Lacombe, Michel, Faivre (cités pour six travaux de sa bibliographie) travaillent aussi sur ce thème de recherche sous l'œil avisé du maître. De nouveaux cas expérimentaux ont été publiés dans lesquels le lien structure-propriétés a pu être évoqué ou mis en évidence que ce soit en France (Trombe et Foëx) ou à l'étranger (Hedvall). Bénard dispose aussi de l'ouverture de la *Chaudronnerie* vers les métallurgistes, les physiciens, les cristallographes (Guinier et Preston sont cités). Or, ces communautés ont déjà adopté la relation structure-propriétés comme norme cognitive (I.3.2). Le travail de Bénard met en évidence au moins deux conclusions importantes : une écrasante domination nationale de la *Chaudronnerie* sur la connaissance des « réactions dans l'état solide » ; un besoin de plus en plus impérieux à mesure que les publications sont plus nombreuses d'ordonner un ensemble de résultats expérimentaux qui s'accumulent depuis les années 1930 à l'échelle internationale.

II.4.2. L'organisation d'un colloque international à Paris (1948)

C'est avec le double état d'esprit d'une domination sociale et d'une incertitude scientifiques que Chaudron décide de convier la communauté européenne à Paris pour discuter des problèmes en cours. Profitant des incitations du CNRS, des crédits de la Fondation Rockefeller (permettant « l'invitation de savants étrangers »), Chaudron et Bénard co-organisent le « 10^e colloque international du CNRS » du 1^{er} au 6 octobre 1948, intitulé les « Réactions dans l'état solide ». La publication du colloque [CNRS, 1949d] permet d'accéder au discours introductif des organisateurs [Chaudron & Bénard, 1949], à la liste des participants (que je distingue en spectateurs, auteurs, orateurs)¹⁴⁴ et au contenu des communications (traduites en français). La publication résume les objectifs du colloque, révèle la composition des participants et présente les différents types de travaux menés sur les réactions dans l'état solide.

Les organisateurs placent explicitement le colloque sous une double inspiration : J. A. Hedvall pour les résultats expérimentaux, J. D. Bernal pour la théorie. Dans un langage semblable à [Bénard, 1946], ils rappellent l'axiome principal : « le caractère commun à la plupart des réactions auxquelles participent les corps solides [...] est leur subordination à des facteurs d'ordre purement géométrique. » La préface énumère ensuite plusieurs résultats expérimentaux des dernières années : stabilité de l'armature de silicates (Wyart), addition de

¹⁴³ La conception (conceptualisation et synthèse) de Bénard est assurément originale parmi les chimistes français. Peut-être sera-t-elle considérée comme naïve par les théoriciens : les phénomènes quantiques n'y jouent aucun rôle, elle reste qualitative et ne contient pas de considérations statistiques. Je ne connais pas la postérité de la notion d'« énergie de mutation » que Bénard semble avoir forgée puisque lors de la première occurrence, elle apparaît en italique et sans référence. Je n'ai pour tout dire pas revu une seule fois cette expression par la suite.

¹⁴⁴ Les « spectateurs » représentent l'ensemble des gens qui assistent aux communications orales (ils sont 43), les « auteurs » signent au moins un des articles qui sont présentés (34), les « orateurs » présentent au moins une communication orale (29). Bien évidemment, tous les « orateurs » sont aussi « auteurs » et tous les « auteurs » sont « spectateurs ».

graphite pour fabriquer des composés lamellaires, orientation sélective des couches d'oxydes croissant sur les métaux oxydés (épitaxie), activité chimique et diffusion variant suivant l'orientation [Bénard, 1946]. Au sein de ces résultats, une large place est donnée à la « diffusion ionique » [Barrer, 1941], problème capital parce qu'elle est liée « à la formation [de] solution solide [...] et des] composés non stœchiométriques* tels que FeO, FeS, ZnO, CdO, etc. ». Pourquoi ces oxydes et sulfures métalliques sont-ils si importants ? La réponse est très claire : leurs « propriétés physiques – conductibilité électrique, perméabilité magnétique – et chimiques – stabilité, activité catalytique – peuvent varier dans de grandes proportions pour de très faibles variations de la composition. On peut ainsi, grâce à de légères modifications apportées aux conditions de préparation, obtenir des corps doués de propriétés remarquables, d'où le grand intérêt industriel qui s'attache à ces études. » Les organisateurs tiennent donc à préciser que les implications entre structure, composition, propriétés et applications font des réactions dans l'état solide un sujet d'actualité qui intéresse non seulement les universitaires mais encore les industriels. La décennie 1938-1948 (malgré la guerre) est présentée comme une période d'intenses « progrès théoriques et expérimentaux » pour les divers aspects des « composés ioniques ou covalents [et] à caractère métalliques ». Néanmoins, devant l'étendue du domaine à couvrir, les organisateurs ont fait le choix des « composés ioniques » dans l'« attente d'un prochain congrès sur les métaux ». Tout en considérant que les réactions dans l'état solide posent un problème général, le colloque parisien a choisi de sélectionner des travaux originaux pour les seuls composés ioniques. À dix ans de distance, il apparaît comme le pendant pour la chimie expérimentale de ce que fut le colloque de Bristol « *Chemical Reactions Involving Solids* » pour la cristallographie théorique.¹⁴⁵

Les organisateurs suggèrent que l'aréopage européen est présent à Paris. Malgré le danger d'une autojustification proclamée, les listes de participants et de communications constituent une source intéressante pour dessiner un paysage européen des réactions dans l'état solide avec une correspondance thématique/géographique. Le tableau fourni en annexe A.II.5 classe les auteurs du colloque suivant leur nationalité, précise le sujet de leur communication et la méthodologie qu'ils emploient.

Avant de passer aux spécificités nationales, décomptons quelques comportements généraux. Il est frappant de voir la diversité des origines : parmi les 19 laboratoires dont le nom est précisé, une moitié vient de la chimie (10) avec une réelle diversité de qualificatifs (appliquée (2), métallurgique (1), physique et électrochimique (1), générale (1)), trois laboratoires de physique, deux en cristallographie et minéralogie, et quatre divers (industriel, d'État, pédologie, radioactivité). Subséquemment sous une appellation unique, les points de vue sont multiples. Parmi les trente-trois communications se mêlent : synthèses, caractérisations (pour la plupart) et applications ; approches théoriques (10% environ) ou expérimentales (pour la plupart) ; études surfaciques et/ou volumiques ; analyses cinétiques, thermodynamiques et/ou structurales (cristallin, lamellaire, amorphe) ; sur des composés métalliques, covalents (graphite) ou minéraux. Une classification (quasiment exclusive) suivant l'objectif principal de la communication peut donner : structure volumique (11), synthèse (8), catalyse et adsorption (5), réactions de surface (oxydation et réduction) (6),

¹⁴⁵ Cette assertion est discutable dans la mesure où il est précisément difficile de distinguer un physicien d'un chimiste étudiant les réactions dans l'état solide. On peut néanmoins se demander dans quelles mesures les organisateurs et les participants font le rapprochement entre les colloques de Bristol et Paris. Plusieurs indices suggèrent le rapprochement. Certains scientifiques ont participé aux deux colloques (Bernal ou Mott par exemple). L'un se tient sous les auspices du CNRS, l'autre de la *Faraday Society* ; la période qui les sépare correspond justement à la décennie d'intense activité dont parlent Chaudron et Bénard ; le premier a été mené par des cristallographes et des physiciens à "la Mecque" des théoriciens du solide anglais tandis que le deuxième est organisé dans le fief de la *Chaudronnerie* (école expérimentale), qui reconnaît sa dette envers l'école de suédoise de Hedvall [BSCF, 1952].

électrochimie (2), techniques de marquage ou d'analyse (2). Les caractérisations des propriétés physiques sont largement utilisées soit pour contrôler mais plus encore pour mettre en évidence les propriétés elles-mêmes. Aucun des travaux ne mentionnent les apports de la mécanique quantique, appliquée au solide. Or, Chaudron et Bénard annonçaient en introduction que « certaines théories fondamentales, comme celle des zones de Brillouin, sont devenues familières aux physicochimistes » [Chaudron & Bénard, 1949].¹⁴⁶ Plausiblement, les acteurs des réactions dans l'état solide réunis à Paris (si l'on excepte les théoriciens comme Mott) connaissent l'existence des travaux théoriques liées à la mécanique quantiques mais ne les utilisent pas concrètement pour réaliser leurs expériences ou pour leurs représentations conceptuelles. Le cas de [Bénard, 1946] cautionne cette interprétation (II.4.1).

Le colloque de Paris fournit une occasion particulière pour étudier les participants français. D'une part, en raison de la proximité géographique, ce sont les plus nombreux (9 des 25 laboratoires présents et 16 des 34 auteurs) mais encore ont été invités des non-chimistes : Guinier, Wyart, Darmois, Daudel. Certains chimistes, cristallographes et physiciens français des « réactions dans l'état solide » se rencontrent donc et s'écoutent du moins dans un cadre international. Les cristallographes s'intéressent néanmoins plus à des phénomènes, à des comportements structuraux particuliers qu'aux composés chimiques proprement dits. Le deuxième point – lié au premier – est la forte représentation de la *Chaudronnerie*, qui tout en organisant le colloque y communique abondamment : parmi les auteurs, neuf des douze chimistes français appartiennent à la *Chaudronnerie* ! La seule autre « famille » de minéralistes (II.3) à assister aux débats est la famille Trombe (Foëx et Trombe) mais elle n'a pas obtenu le droit de communiquer. En revanche, le « Laboratoire des services chimiques de l'État » (II.1) présente deux communications, ce qui suggère une large implication du laboratoire dans les recherches chimiques sur les solides (1/8^e des communications françaises). En particulier, Marcel Mathieu discute de la structure de polymères organiques par diffraction de rayons X, ce qui semble tout à fait exotique pour un tel congrès basé sur les composés ioniques.

À travers la *Chaudronnerie*, les chimistes français insistent sur la synthèse des composés ioniques (5 des 8 articles classés dans synthèse). Deux autres laboratoires de chimie semblent aussi mener des recherches en synthèse : Liège (Dalleman et Brasseur) et Uppsala (Gunner Hägg). Essayer de définir plus avant des spécialités nationales – belges ou suédoises – à partir d'informations aussi ponctuelles relèverait plus de la divination que de l'intuition historique. Il ressort du tableau ci-dessus que sous une même appellation générale « réactions dans l'état solide » se mêlent des questionnements fort différents dans des environnements nationaux et disciplinaires divers. Le colloque de 1948 suggère une porosité des sous-disciplines entre elles autour de thèmes communs : chimie physique et chimie minérale autour

¹⁴⁶ Cette contradiction entre un discours protocolaire et des communications orales peut s'interpréter de diverses manières. 1/ On ne parle pas des mêmes gens : les chimistes (majoritaires au colloque) ne sont pas les « physicochimistes » mentionnés par les organisateurs, ils ont donc parfaitement le droit de ne pas s'intéresser aux théories quantiques du solide et s'en porter très bien quand même. 2/ La situation du colloque est spéciale : les participants sont globalement des « physicochimistes » connaissant les théories quantiques mais ne les utilisent pas ici soit parce qu'ils n'en ont pas besoin pour les réactions dans l'état solide, soit parce que le colloque est ouvertement expérimental. 3/ L'orateur est grisé par la foule : soit il se trompe inconsciemment, soit il trompe sciemment les autres en exagérant les connaissances des physicochimistes en matière théorique. 4/ Je n'ai pas su voir dans les communications les références quantiques que les orateurs mentionnent. Aucune de ces interprétations n'est vraiment satisfaisante. (1) ne correspond pas à l'image d'une *Chaudronnerie* (II.2) aux pratiques physico-chimiques. (2) n'est pas vraiment convaincant non plus puisque les travaux présentés sont originaux et de haut niveau, en d'autres termes, ils correspondent au travail quotidien des chimistes. (3) n'est pas crédible dans la mesure où la flatterie a des limites. Si l'on sait lire, (4) est difficile à croire (encore faut-il avoir lu scrupuleusement !).

du carbone ; cristallographie et chimie autour des silicates ; métallurgie chimique et physique du métal autour de l'oxydation.

Cette rapide description des « réactions dans l'état solide » suggère l'existence d'un réseau international – au moins à l'échelle européenne – dans lequel Suédois, Britanniques, Belges et Français se côtoient, se citent et se connaissent. Il n'est pas question de parler de communauté dans la mesure où les indices récoltés sont trop minces. Un tel réseau est intéressant dans la mesure où, malgré la focalisation sur les composés ioniques, on trouve aussi des solides organiques (Matthieu), des graphites et des métaux. La multiplicité des solides différents va de pair avec une porosité des sous-disciplines impliquées dans cette conférence : chimie minérale, chimie physique, chimie organique, catalyse, cristallographie, physique des solides, ainsi que des industriels. Une telle répartition vient confirmer le décalage entre un système institutionnel, figé et disciplinaire, et un objet « solide », trans-disciplinaire et mouvant (II.1). Mais là, la constatation est plus européenne. Ce qui surprend encore pour ce réseau est son absence d'assises institutionnelles et l'intérêt qu'il suscite. Ses actes sont publiés par un éditeur new-yorkais. Le colloque international de Paris va faire date puisqu'à partir de lui, un colloque sera organisé tous les quatre ans en Europe ou aux États-Unis.

Conclusion

En introduction, je posais le triptyque chimie universitaire, étude des solides et représentation du solide. Comment, après ce voyage en France vers 1950, s'agence finalement chacune des parties ? Aucune des entités n'est superposable aux autres – la chimie préfère l'élément chimique à l'état physique comme critère de démarcation sociale et cognitive (II.1.2.1) – mais chacune s'articule aux autres. Les solides sont étudiés par des sous-disciplines universitaires : chimie minérale d'abord, métallurgie et chimie physique dans un deuxième temps (II.1.1). Une approche disciplinaire ne suffit pas à rendre compte du solide. De la grille de lecture institutionnelle, je suis passé à une approche sociologique en repérant et suivant des groupes. J'en ai distingué trois types. Le premier est propre à l'Université française mandarinale de l'époque (I.2.2) et correspond aux familles scientifiques – Lebeau, Chaudron, Trombe –. La *Chaudronnerie* en particulier montre comment, à partir d'une approche pragmatique des solides, on peut recourir à des transpositions interdisciplinaires de la métallurgie à la chimie minérale et vice versa. Les solides sont alors des objets frontières qui ne prennent qu'un sens local, individuel, expérimental (II.2.2). La réussite sociale prouve que cette vision n'est pas contradictoire avec le contexte de l'époque surtout si elle est couplée à un intérêt pour les applications et une recherche des collaborations industrielles (II.2.1). Ainsi fonctionne le deuxième type de groupe avec qui nous avons fait connaissance : les hautes températures. Associant des universitaires et des industriels, le projet consiste ici à manipuler des instruments, d'abord pour produire de très hautes températures (II.3.1), ensuite pour fabriquer des solides réfractaires (II.3.2). En « chimie des hautes températures », les solides adoptent un statut intermédiaire entre la matière fondue (lors de la synthèse à haute température) et la matière utile (en vue d'applications). Pour de tels groupes, intérêts cognitifs, commerciaux et stratégiques sont intimement liés. Quand on chauffe les solides, ils se mettent à réagir. C'est par cette constatation que s'ouvre la page des « réactions dans l'état solide ». Elles fascinent les cristallographes (I.3.2) puis rapidement les chimistes européens. La *Chaudronnerie* à nouveau – comme pour les hautes températures et la conquête sociale de la chimie minérale – se met en piste et engage son autorité et sa méthodologie heuristique (II.4.1). Mais c'est surtout en réunissant l'aréopage européen à Paris qu'elle révèle les ramifications d'un réseau assimilable à un « collègue invisible » [Crane-Hervé, 1969]. De faibles variations de structures et de composition peuvent induire de fortes variations de propriétés physiques (II.4.2). Les solides reviennent alors sous l'angle double de la composition élémentaire et de la structure cristalline.

Vers 1950, oubliés par la grille institutionnelle, les solides se fauillent vers des groupes dynamiques qui les intègrent à leur thème de recherche : synthèses et caractérisations, productions de haute température, modifications structurales. Chaque groupe n'a pas d'eux une représentation idéale mais les considère dans leur individualité, comme des objets associés à leurs pratiques instrumentales. *Chaudronnerie*, proto-communauté des hautes températures, « collègue invisible » des réactions dans l'état solide, autant de zones d'échanges. Entre le rêve d'un état solide unifié et de multiples solides matériels, c'est le groupe scientifique qui joue le passeur de frontières et détient la clé de l'énigme.

Deuxième partie.

*Dynamiques communautaires :
créations et exclusions (1950-1980)*

Chapitre III.

Des solides en chimie
à la chimie du solide : approche globale.

Chapitre III. Des solides en chimie à la chimie du solide : approche globale..... 120

<i>Introduction</i>	123
<i>III.1. À propos des « origines » de la chimie du solide française</i>	125
III.1.1. Le récit légendaire : l'héroïsme de fondateurs visionnaires.....	125
III.1.2. Le récit des origines en question et la question des origines du récit	128
III.1.3. Deux personnages incontournables, Collongues et Hagenmuller, en un portrait croisé.	129
<i>III.2. Vers une normalisation méthodologique : énoncer la « matrice disciplinaire » (réponse épistémologique)</i>	135
III.2.1. Les solides en chimie minérale : une multiplicité de pratiques (1950).	136
III.2.1.1. En <i>Chrétienté</i> , à la Sorbonne.....	136
III.2.1.2. Marius Picon et les pharmaciens parisiens.....	138
III.2.1.3. Campus de Bellevue : Félix Trombe et les siens.	141
III.2.2. Uniformiser les pratiques en une matrice disciplinaire unique (1980)	143
<i>III.3. La quantification du discours : indices d'une communauté émergente (réponse sociologique)</i>	146
III.3.1. Tendances générales du siècle occidental	147
III.3.1.1. L'édition d'ouvrages, un indicateur de projets personnels (1925-2000) ...	147
III.3.1.2. L'édition de revues spécialisées, la formation d'un public (1963-2000)....	148
III.3.1.3. Évolution des centres d'intérêt.....	151
III.3.2. L'espace national, un réseau de laboratoires en interaction.....	152
III.3.2.1. Évolutions toponymiques.....	152
III.3.2.2. Évolutions épistémologiques : de la synthèse chimique aux caractérisations physiques.....	154
III.3.2.3. Migration ou réorganisation d'un espace (1958-1969) ?	156
III.3.2.4. Cartographie d'un réseau au milieu des années soixante.....	158
<i>III.4. Du réseau de chimie de l'état solide à la communauté de chimie du solide (réponse historique)</i>	160
III.4.1. La chimie de l'état solide entre réactivité et composés non stœchiométriques (1948-1956).....	162
III.4.1.1. Société chimique de France : radiographie du paysage national	162
III.4.1.2. Réactions dans l'état solide et actualité de la relation structure-propriétés	164
III.4.1.3. Le retour des « berthollides » : un avant-goût de chimie du solide	165
III.4.1.4. Dynamisme européen, la « chimie de l'état solide » (1952-1956).....	169
III.4.2. De l'état solide au solide minéral : vingt-cinq ans de spécialisation et d'institutionnalisation (1954-1979).....	175
III.4.2.1. Originalité en synthèse et force motrice des hautes températures.....	175
III.4.2.2. À l'heure de la politique scientifique, quelle place pour l'état solide en chimie minérale (1954-1959) ?	177
III.4.2.3. Balbutiements d'une « communauté » entre outsiders et potentats (1960-1966).....	180
III.4.2.4. Transformations institutionnelles (1966-1979).....	187
III.4.3. La chimie du solide à l'heure anglo-saxonne du « matériau » (1969-1985).....	194
III.4.3.1. La mode <i>sixties</i> des matériaux	194
III.4.3.2. Impact du matériau sur l'idéologie scientifique au tournant de 1970	195

III.4.3.3. Spécificité du matériau en chimie du solide.....	200
<i>Conclusion</i>	203

Introduction

Les deux premières parties ont montré l'ambiguïté de l'objet « solide » pour les sciences physiques et chimiques après-guerre, en France. Malgré un large consensus sur l'idée d'état solide, venue de la physique, le champ de recherche manque de cohérence aux niveaux sociaux et cognitifs. Il présente un visage fragmenté et s'inscrit dans de multiples communautés scientifiques, distinctes entre elles, quoique perméables les unes des autres (I.3). Si aucune communauté ne devient porte-parole du solide, chacune en revanche défend une spécificité propre. Une communauté se distingue alors par son objet d'étude – certains solides –, des méthodes techno-scientifiques différentes (qui incluent les instruments) et des croyances socioculturelles. Des recouvrements s'opèrent entre groupes, des contacts s'établissent, un tissu de relations se développe.

Une analyse plus approfondie a montré que les chimistes étudiant les solides s'organisaient suivant trois principaux types de collectifs, dont la taille et les logiques différaient. Ont été mis en évidence des familles scientifiques pouvant devenir des empires (II.2), de petits groupes thématiques institutionnalisés mais ouverts (II.3) ou des réseaux lâches allant jusqu'à l'échelle européenne (II.4). Chaque type n'exclut pas les autres : la *Chaudronnerie* par exemple joue un rôle majeur aux trois niveaux. Ce faisant, ces groupes constituent des strates sociales et cognitives, superposées et perméables. Aucune de ces strates ne revendique l'appellation « chimie du solide » vers 1950.

C'est sur cette expression d'apparence anodine – « chimie du solide » – que s'ouvre le troisième chapitre. Pourquoi ? Tout simplement parce que les acteurs commencent à se réclamer de la chimie du solide à partir de la fin des années soixante. D'une dispersion des solides dans un patchwork institutionnel, d'une chimie orientée par l'élément chimique vers 1950 (II.1), on passe, en une vingtaine d'années, à une chimie du solide, assumée par un nombre croissant d'acteurs. Ainsi, il s'agit de décrire le processus historique qui conduit des solides en chimie à la chimie du solide.

Le premier critère tangible, ce sont les mots, l'histoire des mots. Que signifie l'expression « chimie du solide » en 1950, en 1970, en 1980 ? Simple étiquette rhétorique ou processus inscrit dans l'organisation sociale ? La chimie du solide correspond-elle à un regroupement ? Et si oui, lequel : familial, thématique, par réseau ? Du langage à l'incarnation sociale, l'étiquette change de sens, sa signification évolue dans un monde, lui-même changeant. L'analyse lexicographique, telle est l'une des méthodes pour repérer des évolutions sociales, des modifications sémantiques. Qu'elle exprime le projet d'un individu isolé ou d'un groupe homogène, qu'elle s'exprime par un témoignage oral ou dans une cérémonie commémorative, qu'elle apparaisse dans une publication scientifique ou un discours politique, l'expression n'a pas le même sens. Aussi, je traque l'association de ces trois mots – « chimie », « du », « solide » – dans les archives institutionnelles (CNRS, laboratoires, Plan d'équipement) et individuelles (dossiers personnels de l'Académie), dans les publications scientifiques (revues, ouvrages) et les comptes rendus de réunions publiques (conférences, congrès, jubilés) et enfin, dernier mais non le moindre, à travers le témoignage des acteurs. Chacune des sources propose un éclairage différent de la même expression.

L'analyse des sources indique clairement que ce sont d'abord et surtout les témoins qui parlent de « chimie du solide ». Prolifiques, ils ne cessent de l'évoquer. Aussi, le chapitre s'ouvre sur un récit fabriqué à partir des témoignages (III.1.1). Ce récit, qui concentre une vision convergente des témoins, raconte l'histoire de la fondation de la chimie du solide. Par

sa structure mythologique, il fait penser à une légende (III.1.2). Trop simple pour être accepté tel quel, ce récit n'en demeure pas moins primordial pour l'historien. D'une part, il révèle l'existence d'un groupe d'êtres humains qui se reconnaissent en un récit légendaire commun et, d'autre part, fournit quelques clés (III.1.3) pour construire un récit plus convaincant. En effet, le récit légendaire suscite beaucoup de questions mais appelle aussi des réponses. La première réponse (III.2) se présente comme une comparaison épistémologique entre quelques publications scientifiques des années 1950-1951, c'est-à-dire avant que l'expression « chimie du solide » n'apparaisse, aux revendications méthodologiques de la fin des années soixante-dix, quand un nombre important d'acteurs se reconnaît dans la chimie du solide. La deuxième réponse (III.3) est plus sociologique : elle propose une approche quantitative consistant à analyser, dans les discours (institutions, revues, publications), les occurrences liées à l'expression « chimie du solide ». Enfin, la troisième réponse (III.4) se situe sur le terrain historique en opposant à la rupture légendaire des origines un déroulement plus progressif, plus collectif et plus institutionnel.

III.1. À propos des « origines » de la chimie du solide française

III.1.1. Le récit légendaire : l'héroïsme de fondateurs visionnaires¹

La plupart des témoignages recueillis s'accordent pour décerner la paternité de la chimie du solide à deux « fondateurs » qui sont Robert Collongues et Paul Hagenmuller.

« Pour moi, la chimie du solide se fonde en France sur deux mouvements d'ensemble. » [I Lucas, 2005, p. 1]; « il existait une forte communauté chimie du solide [...]. Historiquement elle est née avec Hagenmuller et Collongues. » [I Livage, 2001, p. 5]; « Il y avait deux pôles de chimie du solide en France, celle de Hagenmuller à Bordeaux et celle de Collongues à Paris. » [I Boilot, 2000, p. 4]; « Il y a eu deux grands professeurs, presque des mandarins, en chimie du solide, [...] L'un, Paul Hagenmuller, est un peu plus âgé [...] L'autre grand de mon époque, Robert Collongues fut mon patron. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 1].

Chacun des deux « fondateurs » s'inscrit dans une généalogie familiale, via son directeur de thèse, en tant que descendant d'une tradition française plus ancienne :

« Collongues et Hagenmuller sont les descendants de deux professeurs encore plus anciens qui étaient les deux grandes figures de la chimie du solide de l'époque de la guerre. C'était [Georges] Chaudron pour Collongues, [...] puis pour Hagenmuller, c'était [André] Chrétien. » [I Vivien, 2004, p. 1]; « Chaudron était un des grands mandarins de la chimie française [...] Comme mandarin, Chrétien était l'équivalent en chimie des solutions de Chaudron en métallurgie. » [I Lucas, 2005, p. 1].

Les deux maîtres, André Chrétien et Georges Chaudron, sont ainsi désignés comme précurseurs du mouvement. L'apparition de la chimie du solide se situe au confluent de deux autres sous-disciplines : la métallurgie et la chimie des solutions. Cette double ascendance est plaisamment évoquée en termes de baronnies adverses :

« Quand je suis arrivé [fin des années cinquante], la chimie minérale était divisée entre ce que nous

¹ La version de l'histoire proposée ici reprend le récit synthétique donné en introduction sous la forme fragmentée d'une analyse. Comme précédemment, la recomposition de témoignages épars ne prétend pas donner la vision de tel ou telle témoin. Chaque citation, extraite de son contexte, devient une brique supplémentaire pour édifier un récit global, a-personnel et consensuel. Aucun témoin ne le revendique tel quel à son propre compte mais chacun en reconnaîtra des éléments, voire la trame générale. Les témoins cités sont pour la plupart des anciens élèves des personnages dont il est question ici.

appelions familièrement - et irrévérencieusement - entre nous, la « Chrétienté » et la « Chaudronnerie ». Chrétien était le grand homme de la Sorbonne, il avait déjà beaucoup d'élèves. Paul Hagenmuller était l'élève le plus turbulent de Chrétien. [...] A l'opposé, il y avait toute l'école de Chaudron, de la métallurgie française, bien connue et reconnue. » [I Pouchard, 2005, p. 1].

Dans de la continuité généalogique s'inscrit néanmoins une rupture épistémologique. Par opposition avec une « chimie moderne », les pratiques d'alors sont considérées comme désuètes, peu « scientifiques » parce que trop descriptives – des catalogues de composés – et très expérimentales, elles ne cherchent pas à établir de liens entre théorie et expérience :

« A mon avis, la chimie française est restée jusqu'aux années cinquante, à un niveau classique : pas de raisonnement, beaucoup d'expériences, pas vraiment d'interprétation, très descriptive. » [I Vivien, 2004, p. 19].

Collongues et Hagenmuller s'épanouissent au sein de leurs familles respectives, la « Chaudronnerie » et la « Chrétienté », qui structurent le paysage national de la chimie minérale selon deux empires rivaux. Il est important de remarquer la structure sans cesse duale du récit. Cette dualité est source d'oppositions sociales, simples et fortes : entre métallurgie et chimie en solution, entre Chaudron et Chrétien, puis entre Collongues et Hagenmuller. Même si les deux maîtres anciens pratiquent des versions différentes de la chimie, c'est la « chimie minérale » qui est principalement vue comme soubassement de la « chimie du solide ».

« Pour moi, la chimie du solide s'est construite d'abord sur un socle de chimie minérale » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 9] ; « nous sommes une génération de chimistes minéralistes qui sont devenus des chimistes du solide » [I Rousset, 2006, p. 15-16] « La chimie que pratiquait Hagenmuller était purement inorganique, c'est-à-dire chimie minérale qu'on a transformé en chimie du solide » [I Etourneau, 2005, p. 12].

C'est grâce à leur clairvoyance, leur don de « visionnaire », une intuition géniale que les deux patrons reçoivent le titre de « fondateurs » de la chimie du solide :

« Je pense que Hagen a eu un rôle de visionnaire » [I Pouchard, 2004, p. 26] ; « Collongues nous paraissait « supérieur » du point de vue scientifique » [I Kahn-Harari, 2004, p. 12].

Chaque patron associe à une prémonition cognitive une influence sociale suffisamment forte pour convaincre la communauté de la valeur des idées nouvelles. Les « fondateurs » le sont non seulement parce qu'ils sont à l'avant-garde intellectuelle mais encore parce que leur pouvoir mandarin leur permet d'imposer cette représentation avant-gardiste aux autres.

« La chimie du solide française a été dominée par un certain nombre d'équipes [...] autour de Hagenmuller, [...] et autour de Collongues » [I Caro, 2005, p. 9]. « En fait, ce sont Collongues et Hagenmuller qui ont donné l'impulsion première, peut-être même plus encore Hagenmuller. » [I Vivien, 2004, p. 19]. « Messieurs Hagenmuller et Collongues étaient des mandarins dans la mesure où chaque fois que l'un d'entre eux se présentait pour un poste, dans une commission, au CNRS ou à l'Université, il était élu. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 12].

L'équilibre, la symétrie entre les deux mandarins pionniers, peut éventuellement pencher en faveur de l'un ou de l'autre suivant le vécu ou la situation des témoins. Les efforts conjugués des deux fondateurs conduisent la transition de la chimie minérale vers la chimie du solide par étapes successives, l'étape primordiale étant la détermination des structures cristallines.

« La chimie du solide s'est construite d'abord sur un socle de chimie minérale qui s'est associé dans un deuxième temps à la cristallographie avant de se rapprocher de la physique du solide » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 9] « La chimie du solide a eu pour interaction numéro un avec la physique, l'interprétation des rayons X. » [I Caro, 2005, p. 26]. « La chimie du solide est un assemblage d'atomes qui ne peut se percevoir et qui doit se percevoir à trois dimensions, de façon infinie » [I Galy, 2006, p. 20].

C'est par deux ouvertures successives que l'évolution aurait eu lieu, vers des disciplines voisines d'abord, physiciens, cristallographes et métallurgistes :

« C'était une chose extraordinaire pour l'époque parce que chaque laboratoire se refermait sur lui-même. Que la physique s'associe à la chimie minérale était quelque chose d'extraordinaire et ce fut extrêmement productif parce les chimistes savaient qu'on pouvait étudier les structures et qu'ils pouvaient y aller. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 9] ; « On s'est formé sur le tas, nous sommes une génération de chimistes minéralistes qui sont devenus des chimistes du solide au contact des physiciens et des mécaniciens. » [I Rousset, 2006, p. 15-16] ; « il convient de rappeler qu'au lendemain de la seconde guerre mondiale, la chimie du solide n'avait guère droit de cité dans la communauté des chimistes des molécules et des solutions. De sorte que les chimistes du solide se sont rapprochés des spécialistes d'autres disciplines qui pouvaient les comprendre : les minéralogistes et cristallographes d'une part, les physiciens du métal et les métallurgistes d'autre part » (Collongues cité par [Cornet, 1990, p. 20])

puis, ensuite, vers des applications « utiles » et le monde industriel :

« la chimie des solides, très rapidement, d'abord par la présence d'une importante industrie d'applications, s'est tournée vers l'utilité » puis « c'est une évolution vers les applications qui a surtout guidé le chimiste du solide, l'optimisation des propriétés dans les domaines électriques, magnétiques, de luminescence, la thermique, les aspects mécaniques. » [I Dexpert, 2006, p. 2, 5].

Dans une définition, qui se veut totalisante, Hagenmuller présente la chimie du solide comme un projet simultanément cognitif (connaissance de la matière) et pragmatique (modification de la matière) :

« La chimie du solide est une science dure entre la physique et la chimie qui regroupe la préparation des matériaux en fonction de leurs propriétés, la détermination de leur structure (place des atomes, fonction d'onde électronique, surfaces), la mesure et la compréhension de leurs propriétés physiques et enfin la modification de leurs propriétés physiques en fonction de leur structure et composition. » [Hagenmuller, 2005, p. 3].

Dernier des deux patrons, Hagenmuller cherche lui-même à se camper dans la posture du fondateur. Sans équivoque, il se place parmi les premiers au niveau international et comme le « père » de la chimie du solide française :

« Paul Hagenmuller is largely recognized internationally as one of the founders of modern solid state chemistry, i.e. a research field where composition and structure of the materials on one hand, physical or mechanical properties on the other hand can be correlated. » [Hagenmuller, 1998, p. 1].
« J'étais un peu le père de tous les chimistes du solide français » [I Hagenmuller, 2005, p. 5].

III.1.2. Le récit des origines en question et la question des origines du récit

Le schéma narratif produit par cet assemblage de citations extraites de témoignages multiples est simple – probablement simpliste – et fragile. C'est sans doute un château de cartes que l'historien a dû fabriquer d'abord pour pouvoir le souffler ensuite. Il présente pourtant un grand intérêt du point de vue de l'histoire des mentalités parce qu'il fixe par écrit une *mémoire historique commune*, c'est-à-dire un récit ressemblant à une histoire (au sens de narration) commune et rassemblant les bouts de mémoire d'une histoire (au sens de processus) vécue en commun.² C'est cette « mémoire historique commune », fixée comme base de questionnement, qui permet la construction d'une triple réponse : épistémologique (III.2), sociologique (III.3) et historique (III.4). Cette confrontation entre oral et écrit, entre mémoire et histoire, entre eux et moi constitue le fil directeur du récit de sur l'émergence de la chimie du solide (chapitre III).

² L'adéquation entre le récit fixé et la mémoire commune reste une hypothèse de travail puisque la mémoire commune justement n'existe que dispersée dans les paroles des acteurs. J'emploie le terme « mémoire » comme substantif parce que les citations utilisées sont d'abord des paroles prononcées dans l'instant par des membres de la communauté se souvenant. Dans mon propre souvenir d'ailleurs, les parties de texte que je cite dans (III.1.1) n'ont pas été retouchées par les témoins lors de la relecture des interviews. Je qualifie cette mémoire d'« historique » parce qu'il y a élaboration d'un récit cohérent (0.1) à partir de sources orales (témoignages).

Avant de répondre, il est souhaitable d'envisager le récit légendaire en prenant garde à « l'idole des origines » [Bloch, 2002]. Ce récit des origines raconte la naissance d'une discipline et la présente comme la parturition réussie d'une belle discipline, sous l'œil bienveillant de l'*alma mater*, grâce à l'action déterminante de grands hommes. Ces accoucheurs sont socialement dominants et scientifiquement visionnaires. Glorifier le caractère visionnaire présuppose l'idée d'un progrès continu en histoire, la croyance que les sciences progressent continûment, chère aux scientifiques. Paradoxalement, le processus est tout à la fois inévitable (progrès oblige !) et porté par des individus géniaux ! Le récit des origines fournit aussi un exemple concret de l'importance des récits héroïques dans la formation de communautés scientifiques. Il constitue une première étape vers la mise en place d'une mémoire collective à l'occasion de rituels tels que les congrès ou commémorations. En France, ces rites commémoratifs ont d'ailleurs tendance à glorifier les grands personnages plutôt que les institutions.³ Les commémorations de la chimie du solide n'échappent pas à cette tradition.⁴ Le récit légendaire non plus.

D'autre part, la constitution de la discipline est décrite en termes de naissance. Les héros sont inscrits dans des généalogies, des familles scientifiques (II.2) qui se déploient sur plusieurs générations. Des maîtres anciens – Chaudron, Chrétien –, eux-mêmes descendants d'ancêtres séculaires – Le Chatelier, Urbain (II.1.1) –, forment des héritiers – Collongues, Hagenmuller – qui deviennent des patrons et les fondateurs en acte de la chimie du solide. De même que Meillassoux [2001] récuse le fondement biologique de la « consanguinité » et le range parmi les mythes de l'anthropologie contemporaine, l'histoire doit interroger la valeur des images portées par la famille scientifique et la généalogie. D'un côté, la « famille » évoque de manière trompeuse des liens naturels et organiques non seulement entre maître et élèves mais aussi entre condisciples. La *naturalisation*, introduite par la famille scientifique mais aussi dans l'idée d'un progrès suivant le processus naturel de « sélection naturelle » (Darwin), ne doit pas nous tromper. Évidemment la contingence sociale est à l'œuvre en histoire des sciences. Évidemment la généalogie, qui renvoie aux mythes de la genèse (au moins pour les traditions juives, chrétiennes et musulmanes), est largement insuffisante pour déterminer le comportement individuel et collectif. Évidemment les liens dits « familiaux » sont des relations sociales. On ne peut pour autant évacuer la naturalisation d'un revers de main parce que les acteurs eux-mêmes la mentionnent à tour de bras. Ce qui distingue les liens familiaux, c'est qu'ils dépassent largement le cadre d'un rapport professionnel. Par leur prégnance – justement le mot vient de la psychologie –, ils engagent l'identité même des acteurs. Ainsi, tout en restant conscient des ambiguïtés qu'ils recèlent, tout en interrogeant leur raison d'être, je ne renoncerai pas à ce lien social spécifique qu'on appelle « familial ».

III.1.3. Deux personnages incontournables, Collongues et Hagenmuller, en un portrait croisé.

³ Abir-Am & Elliott [1999, p. 30] soulignent la différence entre le culte des héros scientifiques dans la France républicaine et laïque et le Etats-Unis : « *This suggests that American commemorative rites tend to focus on institutions, reflecting the impact of a political culture that emphasizes institutions as manifestations of public will. By contrast, the French commemorative rites tend to focus on personal grandeur as a republican substitute for the royalist and religious iconography that long dominated the country's political culture.* ».

⁴ En ouverture de la Journée Paul Hagenmuller du 16 mai 1997, on trouve cette phrase de Pasteur : « Il est salutaire de rappeler aux cités qui l'oublient, qu'elles ne vivent à travers les âges que par le génie ou la vaillance de quelques-uns de leurs enfants » [Hagenmuller, 1997].

Si le récit légendaire qualifie Collongues et Hagenmuller de « fondateurs » de la chimie du solide, c'est qu'ils y ont joué un rôle important. Pas de doute là-dessus même si probablement le personnage historique ne coïncide pas avec celui de la légende. La plupart des témoignages insistent sur l'importance de leur rôle au sein de la communauté française. Je reviendrai souvent par la suite sur l'idée de « communauté ». Avant de poursuivre néanmoins, je voudrais m'arrêter un instant pour présenter plus longuement les deux personnages à travers leur témoignage propre et celui des autres acteurs (épigones ou non). Plutôt que deux portraits successifs qui existent par ailleurs [Bensaude & Teissier, 2007 ; Teissier, 2008], je trace ici un portrait double, en miroir, arabesques qui font se croiser les trajectoires deux personnages.

Paul Hagenmuller et Robert Collongues appartiennent à la même génération – le premier naît en août 1921, le second en janvier 1924. Pourtant la Deuxième Guerre mondiale va les marquer différemment. Après son baccalauréat (1939), Paul entre à l'université de Strasbourg où il compte bien poursuivre de brillantes études scientifiques. Il vient d'avoir dix-huit ans lorsque la France et l'Angleterre déclarent la guerre à l'Allemagne, le 2 septembre. « Alsacien réfractaire » écrira-t-il en 1960 [Hagenmuller, 1960], il suit en 1941 l'université de Strasbourg repliée en « zone libre » à Clermont-Ferrand. Là, il choisit la chimie pour des « raisons financières » alors qu'il se sent plus attiré par la physique. Il commence alors une thèse de chimie minérale en solution au laboratoire de Chrétien (II.1). Bientôt, il mène en parallèle des opérations de sabotage contre l'occupant allemand. En juin 1943, arrêté par la Gestapo, il est déporté comme « terroriste » à Buchenwald puis Dachau (1943-1945). Là-bas, comme Primo Levi [1958] à Auschwitz,⁵ sa qualité de chimiste lui sauve sans doute la vie en le rendant utile à ses tortionnaires : il sera affecté à la fabrication des fusées V2, qu'il s'efforce d'ailleurs de saboter. Il se mêle à ses compagnons d'infortune, apprend le russe, fréquente des communistes allemands.⁶ On ne peut ignorer l'épisode de la déportation pour comprendre cet homme qui, après avoir souffert et vécu une forme de solidarité universelle, en revient sans haine mais avec un besoin de réussite personnelle, une envie de revanche. Ce personnage tourné vers l'action demeurera toujours plus intéressé par la singularité des individus que par leurs systèmes de pensée simplistes.

Tout autre est le cheminement de Robert à travers la guerre. Il n'a que quinze ans lorsque la France s'engage dans le conflit et, en septembre, il commence son lycée à Montpellier, en « zone libre ». La guerre passera sur lui comme sur la plupart des Français, difficile, sans éclat. Au lycée, il a de très bonnes notes ; brillant, il passe deux baccalauréats en 1942, l'un en mathématiques, l'autre en littérature. Il opte finalement pour une classe préparatoire scientifique (1942-1944) et, après deux ans de *taupe*, intègre l'École de chimie de Nancy (qui deviendra l'ENSIC en 1948). Durant ses années d'École (1944-1947), il découvre

⁵ « Je ne comprends pas. – Eisen, Feuer (fer, feu), insiste-t-il. Et avec les mains il fait le geste de frapper sur une enclume avec un marteau. Il est forgeron. – Ich Chemiker (Moi chimiste), dis-je. Il acquiesce gravement d'un signe de tête : – Chemiker, gut. » [Levi, 1987, p. 31].

⁶ « Ces études ont eu lieu en 1940 à l'université de Strasbourg, repliée à Clermont Ferrand. Mon statut était celui d'un réfugié politique puisque j'avais quitté l'Alsace pour échapper au système politique allemand et parce que je me refusais d'être un jour mobilisé dans l'armée allemande. À Clermont pour des raisons financières j'ai fait le choix de la chimie [...] je suis entré en résistance, je faisais du sabotage. J'ai été arrêté en 1943 et envoyé en camp de concentration à Buchenwald. Là j'ai appris à me taire. J'ai travaillé sur les V2. J'ai appris le russe avec les prisonniers russes; j'avais de bons contacts avec les communistes allemands. » [I Hagenmuller, 2001, p. 1]. « à Buchenwald et à Dachau [...] c'était difficile de survivre ; il a beaucoup communiqué avec les prisonniers russes et polonais et a appris leurs langues pour se donner un but et surmonter ces moments difficiles. Il m'a raconté comment à Dora par exemple, ils avaient appris à faire du sabotage. À l'époque il n'y avait pas de composants électroniques solides mais des lampes. Avec d'autres, ils savaient qu'en laissant tomber la lampe d'une certaine hauteur, trente ou trente-cinq centimètres par exemple, le filament sans se casser devenait inutilisable : lors de l'accélération de la fusée V2, le filament cassait et le V2 n'atteignait jamais son objectif. » [I Pouchard, 2004, p. 28].

la joie de la chimie au laboratoire, l'expérimentation à la paillasse, il se familiarise aussi avec l'industrie lors d'un stage industriel. Son diplôme d'ingénieur en poche, il opte finalement pour la recherche universitaire et se porte candidat à une proposition de thèse (financée) déposée à l'École par Chaudron (II.2.1.4). Après une entrevue avec son futur patron, il est accepté au LCTC et nommé « attaché de recherche au CNRS ». ⁷ Comme les autres étudiants, le jeune homme se trouve alors confronté aux us et coutumes de la *Chaudronnerie* et de l'époque : puissance de la hiérarchie, déférence envers le maître, admiration pour son œuvre. Par la suite, il se montrera moins protocolaire envers le patron que la plupart de ses condisciples tout en conservant un profond respect pour lui. ⁸ Après quelques tâtonnements, Chaudron place son nouveau poulain sur l'étude du protoxyde de fer. Sa thèse d'État constitue une « Contribution à l'étude des propriétés et des modes de décomposition de la phase protoxyde de fer » (1947-1954). Par les méthodes employées, elle est conforme au paradigme de la *Chaudronnerie* (II.2.2) en recourant à « différentes méthodes de la physico-chimie et de la métallographie » [Collongues, 1954]. ⁹ Par le choix du composé – le protoxyde de fer –, elle se place dans la lignée des thèses de Forestier, Michel et Bénard (II.4.1). Enfin, par la focalisation sur la réactivité chimique, elle appartient aux préoccupations de la chimie de l'état solide de l'époque (II.4.2). La patron et son élève se rencontrent souvent, discutent de l'avancement des travaux. Il s'agit de transposer la notion de solution solide, chère aux métallurgistes pour décrire les alliages, à la compréhension des solides non stœchiométriques. Le thésard travaille à la paillasse ; comme pour les autres, le maître inculque ses exigences de rigueur, le souci de l'expérience bien faite, la nécessité des résultats reproductibles. Chaudron intervient aussi pour l'interprétation théorique des résultats parce qu'il dispose du recul nécessaire sur la question. Par leurs efforts conjugués, la thèse est « remarquable ». ¹⁰ Pour la chimie, cette thèse est l'une des premières en France à insister aussi fortement sur le solide « réel » – et non pas idéal – avec ses défauts, et aussi clairement sur la relation entre la structure cristalline et les propriétés chimiques et physiques des solides [Teissier, 2004, p. 18-25 ; 2006, p. 52]. Lorsqu'il termine sa thèse, Collongues est promu chargé de recherche au CNRS (1954-1957). Il est alors en France l'un des spécialistes reconnus de la chimie non stœchiométrique. Quelques années de recherche efficace dans un domaine neuf ont suffi. Par la suite, sa notoriété dépasse rapidement l'espace national puisque sur ces questions, il est

⁷ « Chaudron avait proposé une thèse financée par le CNRS aux étudiants de la promotion qui me précédait. C'est Collongues qui a accepté la proposition et a été retenu. Il est donc venu au CECM dirigé par Chaudron à Vitry. L'année suivante, Chaudron a de nouveau proposé une bourse de thèse. Cette année-là, il n'y eut qu'une fille qui accepta : c'était moi. » [I Mondange, 2004, p. 2].

⁸ « *PT* : *Protocolaire ?* – *DS* : Pour Collongues pas trop, comparé aux autres [anciens élèves de Chrétien] qui avaient des attitudes beaucoup plus protocolaires. Lui essayait de rester naturel, de ne pas trop se déconsidérer mais il était malgré tout dans l'air du temps. » [I Serreau, 2004, p. 5].

⁹ Je ne sais pas quel était l'intitulé initial de la proposition de thèse que Chaudron dépose à Nancy en 1947. Néanmoins, il semble que Collongues ne commence pas directement par l'étude du protoxyde de fer. En effet, le maître aurait d'abord soumis ce sujet en 1948 à Hélène Mondange, ingénieur ENSIC de la promotion suivant celle de Collongues. Lorsque Hélène prend un congé de maternité en novembre 1949, Chaudron aurait confié le sujet à Robert. « Je pense qu[e Chaudron] était très intéressé par ce que j'avais commencé sur les oxydes de fer, entre-temps Collongues avait repris mon sujet. » [I Mondange, 2004, p. 2]. J'utilise le conditionnel parce qu'aucune autre source ne vient recouper ce témoignage. Cette dépossession de sujet – si elle est avérée – suggère que la priorité change pour Chaudron à ce moment-là : alors qu'il accepte de confier le sujet à une jeune femme en 1948 (quand on sait la méfiance qu'il montrait à l'égard des femmes dans son propre laboratoire), il s'empresse de le confier l'année suivante à l'un de ses brillants thésards.

¹⁰ « *PT* : *Comment situer la thèse de Collongues par rapport à cela ?* – *HM* : C'est une thèse remarquable. Il y a un parallèle entre la décomposition du protoxyde de fer et l'eutectoïde fer-carbone (c'est-à-dire l'acier). Collongues m'avait dit qu'il y avait de nombreux points qu'il n'avait pas vus lors de la rédaction de sa thèse et que Chaudron les lui avait montrés. On peut dire que le travail d'interprétation de la thèse de Collongues est dû en partie à Chaudron. » [I Mondange, 2004, p. 1].

écouté par l'aréopage européen en 1956 à Bruxelles (III.4) et par les Américains du *National Bureau of Standards* (NBS) en 1959.¹¹

À nouveau, la situation est bien différente pour Hagenmuller. À la Libération, revenu du camp de concentration de Dachau, il retourne auprès de son patron de thèse. Mais depuis mars 1943, Chrétien a repris un laboratoire de la Sorbonne, le « service de la 3^e section du PCB », et y a été nommé professeur sans chaire l'année suivante. Il s'adonne à la chimie minérale en solution et enseigne la chimie industrielle. Paul peut reprendre des recherches qu'il avait à peine effleurées en 1942. Comme Robert, il bénéficie du développement du CNRS après-guerre et de l'élargissement des crédits de recherche : il reçoit un traitement d'attaché de recherche (1945-1948) puis devient assistant à la faculté des sciences de Paris (1949-1950). Sous la férule du maître, il entreprend une thèse d'État qui fournit une « Contribution à l'étude des nitrites en solution » (1945-1950). Ce sont les propriétés physiques de solutions aqueuses de nitrites qui l'intéressent, en particulier les anomalies qu'elles présentent. Sa démarche se veut « systématique ».¹² Quand le chercheur à la retraite reparle de sa thèse, il insiste sur l'appareil mathématique qu'elle contenait.¹³ Mais comme Collongues, l'étudiant Hagenmuller suit consciencieusement les traces de son patron de thèse. Sa formation à la recherche se fait uniquement en chimie minérale, sur des solutions aqueuses. Lorsqu'il est promu chargé de recherche au CNRS à la fin de sa thèse, il continue dans la même voie des solutions aqueuses, en s'essayant aussi aux sels et précipités (1951-1953). Au final, le jeune chercheur se montre productif mais pas trop : huit publications en sept ans (1948-1955) dans des journaux français. Parmi tous ses travaux, aucun ne se focalise sur des composés solides. Ce point est crucial : le jeune Hagenmuller – celui qui travaille à la paillasse pendant huit ans – est un *minéraliste* des solutions aqueuses.¹⁴ Lorsqu'il dit que la chimie de sa jeunesse est vieillotte, descriptive, il parle de celle qu'il a lui-même pratiquée, celle qu'il a eu sous les yeux en *Chrétienté*, la chimie minérale en solution.¹⁵ Concentré sur les solutions liquides, il ne sait pas à ce moment-là ce qui se fait ailleurs en chimie minérale, en *Chaudronnerie*, chez Trombe, chez Lebeau autour de l'étude des composés solides (voir chapitre II). Au moment où Collongues termine brillamment sa thèse, Hagenmuller ne connaît pas les solides de la chimie ; la seule chimie qu'il a jamais pratiquée à la paillasse est une chimie minérale en solution.

Pourquoi y a-t-il rupture entre le travail du jeune Hagenmuller (1942-1954) et du chercheur mature (après 1956) ? Les interprétations sont multiples. La sienne suggère un cheminement réfléchi. Il serait revenu vers les « matériaux », qu'il a toujours voulu étudier,

¹¹ En 1956, au dixième Conseil de chimie Solvay, Collongues prononce l'une des onze communications : « Les composés non stœchiométriques à caractère métallique ». Trois ans plus tard, il profite d'un déplacement aux États-Unis pour tenir une conférence au NBS à Washington sur les « *New results on non-stoichiometric compounds* » [Collongues, 1979].

¹² « L'étude des travaux antérieurs et l'expérience nous ayant amené à constater la présence d'anomalies dans les propriétés physiques de certaines solutions aqueuses de nitrites, il nous a paru intéressant d'effectuer une étude systématique du comportement de l'ion NO_2^- . » [Hagenmuller, 1950, p. 1]

¹³ « Après la guerre, André Chrétien m'a proposé un sujet de thèse sur la formation de nitrites complexes en solution aqueuse, puis une recherche sur la réduction de divers oxydes par des hydrures d'alcalino-terreux. J'ai accepté parce qu'il y avait un appareil mathématique. » [I Hagenmuller, 2001, p. 1].

¹⁴ Cet aspect a été souligné au moins une fois : « Hagenmuller n'était pas un chimiste du solide : il avait fait une thèse sur les nitrites en solution que personne n'avait lue dans le laboratoire sauf un, moi. J'avais découpé les pages, je n'ai pas tout lu d'ailleurs. Il n'avait pas fait de chimie du solide, il n'était pas manipulateur au sens des expériences [...] manipulateur scientifique non ! Ce n'est pas insultant ce que je dis, c'est une constatation. » [I Galy, 2006, p. 8].

¹⁵ « j'ai fait le choix de la chimie, séduit par la diversité des méthodes de préparation mais choqué parce que la chimie était alors très descriptive et n'était pas encore une science déductive, de réflexion. » [I Hagenmuller, 2001, p. 1]. « Hagenmuller disait que Chrétien faisait de la vieille chimie en solution. [...] il avait d'ailleurs été blessé pendant sa thèse, une manip lui avait explosé dans les mains et il avait perdu des phalanges » [I Tournoux, 2006, p. 14].

dès qu'il en a eu le loisir. Une occasion se présente début 1954. Hagenmuller recroise à nouveau l'histoire tragique de son siècle. Alors qu'en Indochine, la guerre coloniale rentre dans sa huitième année, le jeune chercheur répond aux sollicitations du recteur Lassus, directeur des universités d'Indochine, et part pour Hanoi comme maître de conférences. Après la défaite de Diên Biên Phu, en mai, le Viêt-nam est partagé en deux zones, les militaires et ressortissants français évacuent le nord du pays (dont Hanoi). Mais la France désire conserver une influence culturelle au sud Viêt-nam, alors soutenu par les États-Unis. Hagenmuller accepte de retourner au sud Viêt-nam, à Saigon (1954-1956), mais en échange d'une contrepartie à son retour.¹⁶ En novembre 1956, il est nommé maître de conférences – équivalent de professeur – à la faculté des sciences de Rennes en remplacement de Raymond Rohmer, ancien élève de Chrétien, qui a obtenu un poste à Strasbourg. Entre-temps Hagenmuller a pu tout à loisir mûrir son projet. Si à Hanoi puis à Saigon, privé de moyens, il n'a pu expérimenter, en revanche il a eu le temps de réfléchir. À l'aide d'ouvrages scientifiques, il aurait formé le projet de moderniser l'étude chimique des solides en introduisant des mesures physiques et en développant une originalité de synthèse.¹⁷ Face à ce récit reconstruit, qui voudrait convaincre que la stratégie est planifiée, des variantes ont été proposées par d'autres acteurs. Apparemment le pacte de coopération contre poste de professeur fait consensus. Mais pourquoi ce jeune homme brillant est-il obligé de partir en coopération pour obtenir un poste de professeur alors que les gens de sa génération trouvent facilement des places ? Désir d'ascension sociale, envie de voyager, soif d'aventure, sentiment d'asphyxie à la Sorbonne... Collongues devient maître de recherche au CNRS trois ans après sa thèse (1957), maître de conférences à Paris quatre ans plus tard (1961). Malgré des chiffres voisins (sept ans pour l'un, six ans pour l'autre avant de devenir professeur), le rythme d'Hagenmuller est nettement plus lent. D'abord, Rennes est une modeste université de province qui n'est pas comparable à la Sorbonne (I.2.1), ensuite, Hagenmuller a dû s'expatrier et passer deux ans et demi en coopération pour le gouvernement français avant d'obtenir ce poste. Pour ce qui est des voyages, Hagenmuller les adore, il ne cesse de parcourir le globe durant toute sa vie, parle couramment l'anglais, l'allemand, le russe, l'espagnol. Partir en Indochine participe donc d'une attirance personnelle pour l'exotisme. Cependant, ces raisons ne sont qu'annexes : le nœud du problème se situe dans le rapport personnel entre le maître et son élève. L'interprétation est plus délicate. En *Chrétienté*, le jeune Hagenmuller n'est pas tout à fait en odeur de sainteté ! De nombreux témoignages s'accordent sur des incompatibilités d'humeur, de caractère : un maître directif contre un élève turbulent, des

¹⁶ Hagenmuller n'est pas le seul ancien élève de Chrétien à partir en « coopération » en Indochine. Ainsi, Chrétien [1950] mentionne que Pierre Laurent, qui a terminé sa thèse peu avant Rohmer en 1938, est professeur et directeur de l'École Supérieure des Sciences de l'Université de Hanoi. En 1973, il est devenu professeur à Pau [Chrétien, 1973].

¹⁷ « Puis au lendemain de ma thèse je me suis dit: il faut que je travaille sur des choses plus concrètes, les matériaux. J'ai voulu revenir à mes anciennes amours les matériaux. » [I Hagenmuller, 2001, p. 1]. « À la demande de M. le Recteur Lassus, qui assumait à l'époque la tâche de la direction des Universités d'Indochine, je partais en Janvier 1954 à Hanoi comme maître de conférences. Au lendemain de l'armistice, en raison des liens que j'avais établi avec les nouvelles autorités vietnamiennes, la Direction de l'Enseignement Supérieur me demanda de retourner pour deux ans à Saigon. Ma participation aux événements de 1955, au cours desquels la Faculté des Sciences de Saigon fut l'enjeu de combats et pillée, me valut l'honneur d'une lettre de félicitations du Ministère de l'Éducation Nationale. J'ai quitté l'Indochine en Juin 1956 avec la satisfaction de constater que l'influence française, limitée ou brimée dans tous les autres domaines, paraissait consolidée pour de nombreuses années dans l'enseignement supérieur scientifique. » [Hagenmuller, 1960, introduction]. « Au retour il était entendu que je pourrai choisir un poste de maître de conférences parmi ceux qui étaient disponibles en chimie. Ces deux ans de Vietnam ont été pour moi une période de décantation, de réflexion. Et quand je suis revenu j'ai voulu, d'une part, me préoccuper de physique ce qui suppose la détermination des structures atomiques - pour comprendre les propriétés physiques il faut savoir quelles sont les positions des atomes - et, d'autre part, il faut une certaine habileté à préparer des matériaux par des techniques nouvelles fort différentes. » [I Hagenmuller, 2001, p. 1].

personnalités trop discordantes, trop fortes. Le « père » Chrétien, devenu lui aussi mandarin, tient-il à laisser végéter le fils rebelle ? Celui chercherait alors d'autres voies (détournées) pour grimper. C'est fort possible. Le mandarin se méfie du jeune premier, ralentit sa progression, ne lui permet pas une ascension rapide.¹⁸ L'entrave-t-il parce qu'il le dérange ? À nouveau, il est difficile d'être catégorique. Néanmoins Hagenmuller lui-même fait rarement référence à ses propres travaux de jeunesse, à son directeur de thèse ou à ses condisciples. Quand il en parle avec les étudiants de son laboratoire, c'est pour dénigrer la chimie en solution de la *Chrétienté*.¹⁹

Malgré une multitude de non-dits sur lesquels la psychanalyse aurait des tonnes de choses à dire, il semble admis que le maître et l'élève se querellent et rompent au cours des années 1950. Le jeune Hagenmuller comprend alors qu'il doit s'exiler pour faire carrière parce que, sans son directeur de thèse, il n'a pas vraiment d'appui à la Sorbonne. Cette stratégie est payante : après deux ans à Saïgon, il obtient un poste de professeur à Rennes où il est libéré de sa tutelle, libre enfin de diriger des recherches comme bon lui semble. Rapidement, Hagenmuller développe un Laboratoire de chimie minérale florissant : le professeur séduit les étudiants, l'intrigant se débrouille si bien pour obtenir des financements qu'après seulement quatre années d'activité, le chercheur dirige dix thésards dont le travail est relayé à l'étranger par l'ambassadeur polyglotte.²⁰ Le travail des étudiants est bigarré : certains se penchent sur des « réactions par voie humide » (au moins trois étudiants), les autres « par voie sèche » [Hagenmuller, 1960]. Hagenmuller base donc une partie – 30% – du laboratoire sur son savoir-faire de la chimie des solutions (acquis chez Chrétien) et oriente le reste de ses élèves vers les solides ioniques. En 1961, lors de la première soutenance de thèse qui se tient à Rennes sous sa direction, Hagenmuller manœuvre habilement pour se réconcilier avec le « père » : le jeune professeur propose au mandarin d'être président du jury. Même s'ils n'auront jamais des rapports cordiaux, Hagenmuller et Chrétien se réconcilient. D'ailleurs, lorsque la *Revue de chimie minérale* qu'il a lui-même fondée en 1964 est menacée de disparition en 1988, Chrétien se tourne vers le fils fugueur et lui demande de la prendre en main.²¹

¹⁸ « Hagenmuller n'a pas supporté l'environnement du laboratoire Chrétien. Il s'est fâché avec lui et à la fin de sa thèse, a été envoyé en pénitence à Saïgon. » [I Lucas, 2006, p. 1]. « Paul Hagenmuller était l'élève le plus turbulent de Chrétien. Chrétien l'avait éloigné un peu et envoyé quelque temps dans le Sud-Est asiatique dont on connaît l'image de sagesse : il est resté trois ans là-bas, à une période qui correspondait aux prémices de la guerre [du Viêt-Nam]. » [I Pouchard, 2004, p. 1]. « Ensuite, ça n'allait pas du tout avec Chrétien, il ne lui donnait pas de poste de prof, alors il est parti deux ans au Viêt-nam. » [I Galy, 2006, p. 7]. « *PT* : *Je ne comprends pas pourquoi Chrétien a demandé à Hagenmuller alors qu'ils avaient eu de gros problèmes de relations, non ?* – *MT* : Bien sûr, c'était des personnalités tellement fortes. » [I Tournoux, 2006, p. 14].

¹⁹ Hagenmuller cite Chrétien et Rohmer dans sa première *Notice* [1960] au moment où sa carrière débute, il peut difficilement ne pas mentionner son directeur de thèse. Par la suite, le nom du maître disparaît [1978, 1988 1998] ce qui contraste évidemment avec la *Notice* de Collongues [1979] qui commence par un vibrant hommage au patron. Dans ses interviews, Hagenmuller cite Chrétien une fois en 2001 mais plus du tout en 2004 (durant quatre heures d'interview !). Outre l'opposition personnelle au « père » Chrétien, le chercheur mature cherche aussi à effacer les années de jeunesse – consacrées à la chimie en solution – pour ne donner à voir que l'image du chimiste du solide.

²⁰ « j'ai terminé par chimie générale pour laquelle j'ai eu Paul Hagenmuller comme professeur, il m'avait vraiment impressionné. C'est lui qui m'a contacté en me demandant si je voulais travailler chez lui. Je suis donc rentré dans son laboratoire en 1959, je crois. [...] Hagenmuller, d'une part, enseignait une chimie moderne qui détonnait vraiment par rapport aux cours de ses collègues et d'autre part, c'était un professeur enthousiaste avec un charisme assez extraordinaire. » [I Tournoux, 2006, p. 1]. Dès 1959, Hagenmuller et ses élèves (Jean Rouxel, Robert De Pape, Maurice Rault) font trois communications au congrès international de chimie de Munich. Le patron précise : « La participation active de plusieurs de mes chercheurs à diverses rencontres nationales et internationales a été un signe de vitalité, en même temps qu'elle nous a donné la preuve de l'intérêt que suscitait nos résultats, plus particulièrement auprès de certains laboratoires étrangers. » [Hagenmuller, 1960].

²¹ « en 1961, pour la thèse de Rouxel, André Chrétien présidait le jury de thèse et ce fut, je crois, la réconciliation » [p. 14]. « Chrétien avait lancé, chez Gauthier-Villars, la *Revue de chimie minérale*, reprise par

Ainsi au-delà d'une dualité pratique mais trompeuse, la comparaison des trajectoires de jeunesse des deux « fondateurs » met en évidence une dissymétrie évidente. Si Collongues se place résolument dans la droite ligne de la *Chaudronnerie*, et reste pendant vingt-cinq ans au sein du CECM (1947-1972), Hagenmuller s'éloigne rapidement de la *Chrétienté* pour des raisons psychologiques, puis cognitives. Ainsi, quand il parle de rupture méthodologique, il parle plus ou moins consciemment d'une rupture au sein de la *Chrétienté* et non pas au sein des solides de la chimie (II.1). Si Hagenmuller est un challenger, redoutable duelliste, qui a soif de revanche sur la vie et sur la « famille », Collongues est prince dans un empire florissant, choyé et doué, héritier présomptif d'une principauté sociale et cognitive forte. La différence est immense !

III.2. Vers une normalisation méthodologique : énoncer la « matrice disciplinaire » (réponse épistémologique)

Vers 1950, les solides sont abordés comme des objets particuliers par les chimistes (II.1). Il n'y a pas d'unité de l'état solide (I.3) mais on ne trouve pas non plus d'unité méthodologique. Dans chaque sous-discipline (II.1.1), dans chaque groupe constitué (II.1.2), dans chaque laboratoire, on adopte des méthodes variées, que l'on explicite plus ou moins. Le travail de la *Chaudronnerie* a été largement explicité (II.2). Mais ce n'est pas la seule famille de chimie liée aux solides : Lebeau, Trombe, Chrétien et certains de leurs élèves les fréquentent aussi. Leur travail a été moins détaillé jusqu'à présent. Mettre en évidence leur approche méthodologique exige une analyse des textes produits (III.2.1). Je vais donc m'attacher pour chacune des trois familles rencontrées à décrire une ou deux publications datant de 1950-51, extraites des *Comptes rendus de l'Académie des sciences* (CRAS). Chaque texte renseigne sur des savoir-faire, méthodes ou questionnements. Aucune ambition exhaustive ici mais une volonté de saisir quelques différences épistémologiques. Trente ans plus tard, la situation n'est plus du tout la même d'après le récit légendaire. La chimie du solide a acquis ses lettres de noblesse universitaire et défini une matrice disciplinaire. C'est celle-ci que je voudrais expliciter. Je crois la trouver dans le discours des chefs de file qui rejoignent l'Académie des sciences à la fin des années soixante-dix, début quatre-vingt (III.2.2).²² En comparant le contenu des textes de 1950 à celui des discours de synthèse de 1980, on saisira probablement un écart dans les méthodes, les savoir-faire et les représentations. C'est cet écart que j'appelle « réponse épistémologique ».

Silber, un de ses élèves qui a peu marqué la science d'un point de vue créativité scientifique. Quand Silber a pris sa retraite, Chrétien a un peu paniqué pour l'avenir de sa revue et a demandé à Hagenmuller de reprendre le flambeau. Hagenmuller a dit "je veux bien à condition que quelqu'un s'en charge" et il m'a demandé de m'en occuper. Je me souviens du sourire de Chrétien quand j'ai accepté de reprendre le bébé. » [I Tournoux, 2006, p. 13].

²² Le choix des *Comptes rendus* pour les articles de 1950-51 correspond à l'influence qu'exerce cette revue sur la communauté française : tout le monde publie et lit les CRAS en France à ce moment-là, les articles qui s'y trouvent sont donc caractéristiques du travail des laboratoires. J'aurais pu procéder de même pour 1980 mais les *Comptes rendus* n'ont alors plus du tout la même influence. Il aurait fallu trouver un équivalent : il n'y en a pas. En revanche, l'Académie continue d'exercer un attrait sur la communauté universitaire. Pour avoir une idée des méthodes en vigueur vers 1980, je me focaliserai donc sur le discours des acteurs des solides qui y sont admis (justement à partir de la fin des années soixante-dix) : Paul Caro (1978), Hagenmuller (1978), Jean Flahaut (1983), ainsi que Collongues (parce qu'il est incontournable). La comparaison n'est donc pas homogène mais mon ambition est purement qualitative.

III.2.1. Les solides en chimie minérale : une multiplicité de pratiques (1950).

III.2.1.1. En Chrétienté, à la Sorbonne

L'approche de Chrétien est opposée à celle de Chaudron sur divers points. Sa thèse menée au laboratoire de Georges Urbain sous la direction d'Eugène Cornec et soutenue en 1929, porte sur les solutions aqueuses à température ambiante. Par la suite, avec ses premiers élèves, il étend son travail aux solutions non-aqueuses. En 1950, Chrétien, devenu professeur, résume ainsi ses travaux : « Je reste fidèle aux deux genres de recherches qui m'ont valu les premières considérations : équilibres entre sels et solutions aqueuses, et réactions en milieu non aqueux. » [Chrétien, 1950, p. 17]. C'est donc essentiellement par l'entremise des sels, composés précipités au fond des solutions, qu'il prend contact avec les solides. Il trace des diagrammes ternaires d'équilibre thermodynamique de ces sels. Chrétien oriente aussi quelques études vers les réactions hétérogènes : solide-gaz (oxydation des sels métalliques) et réactions catalytiques.²³ Certaines de ces réactions le poussent à utiliser les hautes températures (autour de 1000°C) et à développer quelques techniques de chauffage au sein du laboratoire. Les diverses études de ses élèves relèvent ainsi de la chimie minérale certes mais aussi des chimies organique, analytique et thermodynamique. Les thèmes de recherche passent alternativement du liquide au solide et au gaz, de l'hydrogène au tungstène et à l'uranium. On retrouve là une caractéristique des laboratoires de chimie de l'époque (II.1.1.3).

Le souci premier de Chrétien ne semble pas l'étude systématique d'un état physique unique ou d'un élément chimique particulier mais plutôt de « rester chimiste ». Il considère les « méthodes physiques » seulement comme des « auxiliaires », elles viennent après la synthèse, après l'analyse chimique. Son propos est programmatique : la synthèse et l'analyse doivent rester le propre de la chimie ; si l'instrument physique est indispensable, son emploi doit rester occasionnel ; le chimiste a des besoins modestes, son originalité créatrice lui suffit.²⁴ Chrétien cherche donc à convaincre que la chimie possède un esprit et des méthodes propres. Si elle oubliait cette démarcation, elle perdrait son efficacité et son originalité. La réaction chimique constitue un moyen (par exemple pour obtenir des données thermodynamiques), mais aussi une finalité (par exemple la détermination d'un mécanisme réactionnel). Chrétien défend l'idée d'une spécificité disciplinaire, revendiquant une chimie « pure », rigoureuse, régie par la synthèse et l'analyse à la manière de Lavoisier dont il se

²³ L'un des premiers étudiants de Chrétien, Raymond Rohmer, soutient un doctorat ès sciences, « études sur le sulfate de nickel et le sulfate de cobalt », à Strasbourg, en 1939. Cette thèse reflète le type de travaux que mène Chrétien sur les composés solides : tracé de « courbe de solubilité » des sels (sulfates de cobalt et nickel) dans l'eau avec « analyses chimique » (composition), « thermique » et « dilatométrie » (chapitre 1) ; « autre méthode d'analyse » (chapitre 2) ; « diagramme ternaire $\text{SO}_4\text{Ni-SO}_4\text{Co-H}_2\text{O}$ » (chapitre 3). Rohmer conclut ainsi : « Au total, ce travail nous paraît présenter un ensemble de conclusions cohérentes sur la formation des hydrates salins et la syncrystallisation de deux sels hydratés voisins. » [Rohmer, 1939]. C'est la formation du composé chimique qui est ainsi mise en avant.

²⁴ En 1941, Chrétien écrit dans sa *Notice* : « Les méthodes physiques doivent être considérées comme des auxiliaires des recherches chimiques. Au contraire on les utilise trop souvent comme une fin, parfois même en se préoccupant pas assez de leurs conditions d'application. Il est incontestable que l'on ne travaille plus assez en chimiste. » [Chrétien, 1941]. Puis en 1948, à l'École supérieure de chimie de Mulhouse, il déclare lors d'une conférence : « une idée d'intérêt général qui me tient à cœur : montrer que l'on peut encore travailler avec chance de réussite dans le domaine de la chimie minérale en utilisant des moyens simples. [...] Je pense que les grandes méthodes physiques modernes (infra-rouge, effet Raman, électrons et même rayons X) ne doivent intervenir qu'en seconde ligne pour mettre à l'épreuve les conclusions d'une étude ordinaire ou pour étendre ses possibilités d'investigation à l'analyse structurale. Un chimiste doit pouvoir s'en passer parce que les véritables problèmes de chimie ne tombent pas dans le champ d'action de ces moyens. » [Chrétien, 1949].

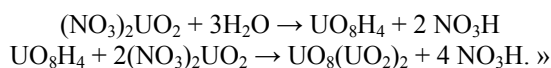
réclame [Chrétien, 1951, p7, 16-17]. La diffraction des rayons X n'est pas intégrée au programme de recherche du maître. La *Chrétienté* se pense aussi elle-même par référence à la synthèse chimique : lors du jubilé du « patron » en 1973, l'un de ses premiers élèves, Rohmer, insiste sur le rôle de Chrétien et celui de ses élèves en « chimie de synthèse inorganique » [Rohmer, 1973].

Je voudrais maintenant comparer cette revue générale, sorte d'*épistémologie chrétienne*, à deux publications de la *Chrétienté* liées aux solides. C'est par l'académicien Louis Hackspill (II.1.2.2), connu pour ses cours catalogues, que Chrétien et les siens accèdent à la tribune de l'Institut de France. Gabriel Tridot [1951] fait un compte rendu « Sur le peruranate d'uranyle », sujet de sa thèse, terminée en 1949. En faisant réagir en solution de l'eau oxygéné sur le nitrate d'uranyle, Tridot obtient « un précipité jaune soufre », le peruranate d'uranyle, dont il veut déterminer la formule. Pour ce faire, il suit d'abord par « conductimétrie » la réaction et propose un mécanisme réactionnel pour expliquer le formation du sel : $\text{UO}_8(\text{UO}_2)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$.²⁵ « Les résultats expérimentaux semblent confirmer ce point de vue ». Tridot en donne trois (mais aucune analyse chimique quantitative – explicite du moins –) : 1/ réaction du sel obtenu sur un autre réactif (la soude) qui « tend à prouver que dans le sel considéré un seul atome d'uranium se trouve à l'état peroxydé, les deux autres étant sous forme de cation UO_2^{++} » ; 2/ une réaction quantitative donne un produit « identique » au peruranate d'uranyle – n'est toutefois pas spécifié ce qui est identique – ; 3/ l'analyse par « spectres d'absorption IR » du sel présente une « bande située à 920 cm^{-1} » caractéristique « d'après Lecomte et Freymann » de UO_2^{++} et « des bandes susceptibles d'être attribuées au groupement UO_3 [forme peroxydée] ». Enfin par « analyse thermogravimétrique », Tridot montre que le sel perdant 3 mol d'eau à 100°C est un « persel » et non un « peroxyde » comme le pensaient ses prédécesseurs.

Ce premier exemple montre les principes de Chrétien en action. La partie chimique (synthèse et analyse) est prépondérante, l'intuition chimique permet de proposer un mécanisme réactionnel en fonction des diverses réactivités des corps en présence. La réaction chimique sert doublement pour fabriquer un composé solide mais aussi pour le caractériser. Les techniques physiques apparaissent comme de simples ustensiles pour suivre la réaction ou confirmer une supposition (formule et mécanisme). C'est la convergence des caractérisations chimiques (résultats 1 et 2) et des mesures infrarouges (résultat 3) qui permet de conclure à la présence des deux degrés d'oxydation pour l'uranium et livre ainsi la formule du persel. La référence paradigmatique est ici l'élément chimique (analyse chimique), la formule du composé et en aucun cas la structure solide (la diffraction des rayons X est absente). L'identité de deux corps est une identité analytique et non pas structurale.

Le deuxième exemple nous conduit de la chimie des sels en solution aqueuse à la chimie à haute température. Chrétien et son élève Freundlich font une communication « Sur la formation d'un laitier au titanate par réduction sélective de l'ilménite. » [Chrétien & Freundlich, 1951]. L'ilménite constitue un mélange d'oxydes de titane et de fer de composition variable suivant la provenance du minerai naturel. Les auteurs veulent séparer le fer et le titane en jouant sur la réactivité différente de leurs oxydes suivant la réduction. La réduction se fait à

²⁵ « Nous considérons le précipité obtenu par action de l'eau oxygénée sur le nitrate d'uranyle comme un peruranate d'uranyle. L'action de la soude sur ce persel, celle du nitrate d'uranyle sur le peruranate de sodium et les spectres d'absorption IR confirment la présence d'un atome d'uranium sous forme peroxydée et de deux autres sous forme de cation UO_2^{++} . Nous lui attribuons la formule $\text{UO}_8(\text{UO}_2)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. » Le mécanisme comporte « deux réactions simultanées :



[Tridot, 1951].

haute température (autour de 1000°C) en présence d'un réducteur (le graphite), qui réduit sélectivement les oxydes de fer, et d'un fondant (le carbonate de sodium), qui sépare, en abaissant les températures de fusion, l'oxyde de titane et le fer réduit. La séparation est liée à des différences de densité : le laitier, qui contient l'oxyde de titane, surnage tandis que la fonte, qui contient le fer réduit, plus lourde, coule.²⁶ Les solides sont portés à haute température et fondus dans un four électrique à résistance de graphite. Les expérimentateurs modifient éventuellement la quantité de fondant, la masse de réactifs utilisés. La seule construction quantitative est une courbe de rendement en fonction de la température de réduction : ce qui compte ici surtout c'est de montrer une méthode simple et « sélective ». L'analyse chimique et la diffraction des rayons X ne sont pas utilisées pour caractériser la réaction.

Ce deuxième exemple confirme et précise trois observations précédentes : peu d'intérêt pour la structure des solides mais plutôt pour leurs propriétés chimiques (réactivité) et physiques de base (densité) ; les moyens mis en œuvre sont simples et bon marché ; l'importance du quantitatif (mesures physiques) est faible en regard de l'astuce expérimentale déployée par le chimiste. Cet exemple élargit aussi la palette des thèmes abordés en *Chrétienneté*. La chimie est ici ouverte vers la minéralogie : le réactif principal est un minerai dont la composition dépend des lieux de production (Sénégal, Norvège, Egypte). Ceci correspond à un problème concret de chimiste dont le travail dépend de l'approvisionnement en matière première. Le recours à l'ilménite suggère une chimie non affranchie des produits naturels. Les procédés (four électrique) et le vocabulaire employé (laitier, fonte) rapprochent aussi le chimiste des problèmes de métallurgie et du vocabulaire des industriels.

Si Chaudron étudiait simultanément les métaux et les oxydes métalliques en transposant d'un domaine à l'autre des concepts et des techniques adéquats et en ouvrant son laboratoire aux applications industrielles, Chrétien en revanche se pose en gardien d'un territoire menacé : la « chimie pure » qui, perdant sa spécificité, doit être protégée par les remparts de l'analyse, de la synthèse et de l'intuition chimiques. Il ne faut surtout pas que l'originalité soit disqualifiée au profit d'une valorisation de la quantification, les procédés doivent rester simples et efficaces. Chrétien reconnaît une utilité aux instruments et aux mesures physiques mais seulement dans la mesure où ils viennent confirmer le travail du chimiste. Dans l'étude des solides, il ne place pas la diffraction des rayons X au cœur de sa méthode et lui préfère la détermination des grandeurs thermodynamiques (en particulier le tracé de diagrammes ternaires). Le chimiste peut aussi mettre son intuition et son esprit pratique au service des problèmes industriels (minéralogie, métallurgie).

III.2.1.2. Marius Picon et les pharmaciens parisiens.

Lebeau et Chrétien se distinguent de Chaudron en ce qu'ils ne se concentrent pas exclusivement sur les solides. Gaz, liquide et solide se mêlent au fil de leurs travaux. Lebeau se distingue de Chrétien parce qu'il s'est spécialisé en chimie des hautes températures où il

²⁶ « L'ilménite est essentiellement formée d'oxyde titanique TiO_2 associé à deux oxydes de fer FeO et Fe_2O_3 , en proportions très variables suivant son origine, pour ces deux derniers surtout qui peuvent être en proportions très différentes (ilménite sénégalaise, riche en Fe_2O_3 ; ilménite norvégienne, riche en FeO) ou comparables (ilménite égyptienne). L'oxyde TiO_2 se différenciant des oxydes de fer par une résistance relativement grande à la réduction, nous avons recherché dans quelle mesure il est possible de séparer le titane et le fer par réduction limitée aux oxydes de fer. L'opération utilise un fondant, carbonate de sodium, qui permet le partage de la masse en deux phases liquides par différence de densité : une fonte, et un laitier rassemblant le titane. [...] Le mélange d'ilménite-carbonate de sodium-carbone (de 20 à 30g) contenu dans un creuset de graphite est fondu dans un four électrique à résistance de graphite. »

rejoint Chaudron. L'annexe A.II.2. montrait la diversité des études menées au sein du laboratoire de Lebeau : de la métallurgie à la chimie analytique des gaz (II.1.1.3). L'un des groupes de la famille Lebeau, dirigé par Marius Picon, se concentre sur les solides.

Élève (1910-1919) puis collaborateur (1919-1937) de Lebeau, Picon met au point un four à arc « sous atmosphère contrôlée » avec une résistance de graphite, qui ne se volatilise qu'à 2300°C [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 4]. L'atmosphère contrôlée de gaz inertes (N₂, Ar) ou de vide permet de s'affranchir de l'air oxydant (pas trop gênant uniquement dans le cas des oxydes). Grâce à cette réalisation technique, Picon peut travailler à haute température et sous atmosphère contrôlée sur un sujet original : les sulfures et les oxysulfures métalliques. Il commence par étudier les conditions de dissociation des sulfures métalliques et remarque que « parmi ces composés, les sulfures des métaux des terres rares sont les plus stables » avec des points de fusion voisins de 2000°C. Il observe aussi que les « sulfures de terres rares forment des masses fondues d'aspect vitreux et il en détermine les principales propriétés. » [Lebeau, 1950, p. XXI-XXII]. Après avoir occupé une chaire de physique (1937-1946), il succède à Augustin Damiens à la chaire de chimie minérale en 1946. Des conditions matérielles difficiles au début n'altèrent ni son enthousiasme, ni son dynamisme. Passionné par la recherche, « s'attachant tout aussi bien aux plus humbles comme aux plus brillantes besognes », son activité débordante se tourne « essentiellement vers les études préparatoires [... avec de] bien timides [...] préoccupations structurales » [Flahaut, 1976, p. 6]. Il encourage ses deux premiers thésards à poursuivre ses propres travaux sur les sulfures métalliques et la chimie des hautes températures.²⁷

En 1951, Jean Flahaut, l'un des deux premiers étudiants de Picon, défend sa thèse sur les sulfures d'aluminium (1946-1951) [Flahaut, 1976, p. 9]. La même année, il présente deux communications à l'Académie par l'intermédiaire de Lebeau. La première, « Sur la préparation et la structure cristalline du sulfure d'aluminium S₃Al₂ » [Flahaut, 1951a], concerne l'amélioration d'une méthode de préparation, dite de Fonzes-Diacon (citée dans un livre sur les colloïdes [Meyers, 1942, p. 317]), puis la synthèse effective d'un sulfure d'aluminium (S₃Al₂) à haute température. L'amélioration technique vise à augmenter la pureté chimique du solide produit. L'auteur précise scrupuleusement l'état macroscopique des solides observés et les compositions chimiques des réactifs, des produits intermédiaires et final en les comparant aux chiffres attendus suivant la formule « théorique ».²⁸ Après croissance des cristaux jusqu'à une dimension millimétrique (« 1 à 3^{mm} de côté »), ils sont analysés par la « méthode de Laue » pour déterminer la symétrie du cristal puis par la méthode de poudres pour obtenir les paramètres de la maille cristalline. Certaines poudres se comportent comme des « monocristaux » – ce que l'auteur attribue à des « cristallites d'orientation parallèles ». À partir de là, l'auteur compare la « densité calculée en admettant six molécules S₃Al₂ dans la

²⁷ La Notice [Flahaut, 1976, p. 6] est corroboré par l'interview [I Flahaut & Rivet, 2005] plus détaillée.

« JF : Lorsque je suis arrivé au laboratoire en 1949 (rires), Picon le dirigeait depuis peu puisque Damiens venait de mourir. Il y avait deux chercheurs – je me souviens de cette chose-là – mais Picon était un homme extrêmement dynamique, qui a su orienter la recherche du laboratoire vers la chimie des hautes températures.

« Le père Picon était spécial mais il était très actif, très entreprenant... » [p. 4]

« Picon faisait déjà une chimie de synthèse à haute température. Il devait être sensible aux sulfures puisqu'il y avait déjà des sulfures dans ma thèse. Il travaillait sur des sulfures et des oxy-sulfures. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 8].

²⁸ « Le produit obtenu présente une cassure brillante, ternissant rapidement à l'air, et doit être manipulé et conservé dans une atmosphère de gaz carbonique sec. L'analyse révèle la présence d'environ 3% d'aluminium libre finement dispersé dans la masse. Cette matière première est purifiée par chauffage de 6 heures, sous une pression de quelques centièmes de millimètres de Hg, vers 1150°, température peu supérieure au point de fusion. Le sulfure ne se vaporise pas sensiblement, mais l'aluminium en excès est éliminé totalement. Il reste dans la nacelle une masse blanche, à surface brillante légèrement irisée, à structure cristalline, correspondant à la formule S₃Al₂ (S : 63,2% ; Al : 36,3% ; théorie : S : 64,07% ; Al : 35,95%). » [Flahaut, 1951a].

maille » ($d=2,33$) à la « densité mesurée » ($d_4^0=2,32$) et les trouve très proches. En faisant une hypothèse sur la structure des sulfures, il en déduit un « rayons cristallin [...] $r=1,85\text{\AA}$ [...] en excellent accord avec le rayon ionique attribué à S^{2-} : $r=1,84\text{\AA}$ ». Enfin, il montre que des poudres de sulfure d'aluminium issues de synthèses différentes exhibent le même spectre de rayons X.

La publication est centrée sur une question de purification. Flahaut compare soigneusement les grandeurs extraites de l'expérience (analyse chimique, densité, rayon cristallin) et celles qui peuvent être calculées (formule chimique, densité) ou tabulées (rayon ionique). Il s'agit de recouper au maximum les informations dont dispose l'expérimentateur. La diffraction des rayons constitue l'un des deux moyens privilégiés (avec l'analyse chimique) pour caractériser, c'est-à-dire ici contrôler, le produit obtenu. Celui-ci est examiné sous sa couture chimique (composition élémentaire) et sous sa couture structurale. Malgré l'étude d'un solide macroscopique (infiniment périodique), la référence demeure la « molécule »* (pour calculer la densité) ou l'ion (rayons ionique). La chimie qui se veut structurale demeure liée à la chimie des solutions et à la chimie organique.

Le deuxième article « Sur une variété de sulfure d'aluminium stable à haute température » [Flahaut, 1951b] relate la méthode de préparation d'une nouvelle forme cristallisée de sulfure d'aluminium ($S_3Al_2\beta$) à partir du composé obtenu précédemment ($S_3Al_2\alpha$). La forme (β) est obtenue en deux étapes : 1/ volatilisation de (α) autour de 1500°C « sous 1/10 de millimètre de mercure » qui donne un mélange de (β) et de carbure d'aluminium, puis 2/ séparation des vapeurs du sulfure et du carbure par fractionnement en jouant sur les différences de volatilité dans une colonne de graphite soumis à un gradient de température. « Le sulfure d'aluminium condensé [(β)] se présente sous forme d'aiguilles cristallines incolores » (5 à 6mm). La diffraction des rayons X montre des spectres différents pour les formes (α) et (β). Cependant le passage (α) \rightarrow (β) n'est pas un processus continu mais une « transformation [...] discontinue », il n'a lieu que par vaporisation de (α) en (β) (ou par ajout de carbure mais le produit final est alors un mélange de carbure et sulfure). « On n'observe pas de spectre intermédiaire, ce qui confirme l'individualité cristallographique des deux formes de sulfure » dont la forme (β) est le « produit stable à haute température ». L'auteur remarque ensuite « l'identité parfaite des intensités de raies de ces diagrammes de poudre* ou de cristal tournant avec celles des diagrammes de corps du type wurtzite, tels que NaI. » Enfin, il conclut en soulignant l'analogie de ses propres résultats avec ceux de chimistes allemands sur « une variété β du sulfure de gallium S_3Ga_2 » [Hahn & Klinger, 1949, p. 135].

Cet article montre à nouveau l'intérêt de Flahaut pour la synthèse de sulfures purs. Lorsqu'il obtient le composé (β) par chauffage d'un mélange de (α) et de carbure, le procédé « ne peut être regardé comme une méthode de préparation » de (β) car le produit obtenu est lui aussi un mélange (de β et de carbure). La purification est ici primordiale : la séparation des carbures et des sulfures s'opère en utilisant une différence de propriétés physiques (la volatilité des composés) de manière simple et ingénieuse. Les nouveaux composés sont alors caractérisés par leur aspect macroscopique et par leur structure nanoscopique grâce aux « diagrammes de cristal oscillant et de Laue ». D'autre part, le chimiste français cherche des relations, des points de ressemblance avec les structures de référence qui sont tabulées (comme la wurtzite) ou des structures de composition voisine (S_3Ga_2 à comparer à S_3Al_2) qui sont à l'étude ailleurs (en Allemagne dans ce cas-là).

Les deux articles suggèrent que le programme de recherche de Flahaut dans les années 1950 est résolument chimique. Ce qui compte avant tout c'est soit fabriquer de nouveaux composés solides non encore identifiés, soit obtenir des espèces déjà mentionnées mais les

purifier mieux que ses concurrents. Le souci de purification fait penser à la tendance déjà générale mentionnée (II.1.1.2). Cette chimie est essentiellement une « chimie des hautes températures » (II.3). Les moyens dont il use pour caractériser les produits obtenus sont l'aspect macroscopique (forme, couleur), l'analyse chimique et la diffraction de rayons X. Un lien supplémentaire vient rattacher la synthèse à la caractérisation lorsque le chimiste essaie de faire croître des cristaux jusqu'à des tailles millimétriques (1 à 6mm) pour les analyser par des méthodes nécessitant des « monocristaux » (méthode de Laue ou du cristal oscillant). Les diagrammes de poudre constituent néanmoins le moyen privilégié pour obtenir les paramètres du réseau. Une préoccupation transversale à la synthèse et la caractérisation est le souci de se situer « par rapport à », de créer des comparaisons avec diverses références : chimie des solutions, chimie organique, cristallographie (tables de structure cristalline), travaux des concurrents (en particulier étranger). Il s'agit d'établir des faisceaux de preuves convergents pour accréditer la synthèse réalisée.

III.2.1.3. Campus de Bellevue : Félix Trombe et les siens.

Tandis que Chrétien travaille sur n'importe quel élément, Chaudron sur quelques-uns (Fe, Al), Picon sur un certain type de composés solides (les sulfures métalliques), Trombe et ses élèves, héritiers de Urbain (II.2.1.4), focalisent leur attention sur une seule période du tableau périodique : les éléments des terres rares et leurs composés. Depuis les travaux d'Urbain des années 1920, le domaine des terres rares a évolué sur au moins trois points déterminants. Tout d'abord, le problème de la séparation des éléments a été partiellement résolu durant la Deuxième Guerre mondiale grâce aux efforts mis au service du Projet Manhattan, pour lequel l'ingénierie chimique de Dupont de Nemours a joué un rôle crucial [N'Diaye, 2001]. Pour obtenir du plutonium fissile « propre » – si l'on peut dire –, les chimistes du projet ont dû le séparer des impuretés, parmi lesquelles on trouvait beaucoup de terres rares. Les grandes quantités à traiter interdisaient le recours aux fractionnements traditionnels (à la manière de Urbain), trop peu efficaces. Un universitaire américain de Ames, Franck Spedding est chargé, par les militaires, de résoudre le problème de séparation. Il obtient des moyens considérables. Lui et son équipe développent une nouvelle méthode de séparation par résines échangeuses d'ions qui s'avère beaucoup plus efficace que les cristallisations fractionnées, ce qui fera sa gloire. Cette évolution technologique liée aux efforts d'armement atomique balaye les méthodes d'entre-deux-guerres même au sein des laboratoires universitaires.²⁹ Deuxièmement, sous la direction d'Urbain, Trombe a mis en évidence en 1935 le ferromagnétisme du gadolinium, premier métal ferromagnétique découvert en dehors de la famille du fer [Urbain & al., 1935]. Cette nouvelle propriété rend plus attrayante encore

²⁹ « Ce qui a transformé fondamentalement la recherche dans le domaine des terres rares c'est le Manhattan Project. Les terres rares étaient un modèle inactif pour la séparation des actinides nécessaire à la préparation du plutonium. C'est à Ames dans l'Iowa que se trouvait le seul spécialiste américain des lanthanides. Franck Spedding fut convoqué au Pentagone par la Maison Blanche, en 1942 je crois, et chargé de mettre au point des techniques de séparation. Il disposait de tout le personnel qu'il voulait. Il a d'abord essayé les échanges d'ions cela a très bien marché. La séparation des lanthanides est devenue un programme compagnon de la séparation des actinides. Par contre pendant la guerre, en France, les études sur les terres rares n'avaient pas avancé. D'abord Trombe était prisonnier. Et quand il est revenu, les techniques avaient évolué: les échanges d'ions rendaient les cristallisations fractionnées caduques. » [I Caro, 2002, p. 2]. Pour une revue états-unienne de l'état de l'art sur les terres rares en 1961, on pourra se référer à [Spedding & Daane, 1961]. L'introduction (qui se veut historique) insiste uniquement sur les apports du nucléaire civil (« *reactor fuels* ») et passe la phase militaire qui l'a précédée sous silence.

l'étude des terres rares et fait miroiter des applications potentielles.³⁰ Enfin, le paradigme de l'élément, défendu par Urbain au début du vingtième siècle, a été remplacé par celui de la structure atomique, en particulier pour les solides, celui de la structure cristalline.

Après-guerre, le Laboratoire des terres rares est installé sur le campus de Bellevue (I.2.3). D'abord orienté vers « l'élaboration des métaux des terres rares » durant les années trente [RA LTR, 1965, p. 2], il évolue vers des analyses structurales (états allotropiques) et surtout des mesures physiques (spectroscopiques, magnétiques, dilatométriques, électriques, thermomagnétiques). Après-guerre, outre les métaux, les chercheurs de Bellevue étudient aussi les oxydes et sulfures de terres rares.

Au quotidien, les terres rares ne sont pas les seuls éléments étudiés par la famille Trombe. Foëx et Trombe ont orienté une partie de leurs activités vers la chimie des hautes températures avec la particularité d'utiliser l'énergie solaire (II.3, chapitre V). L'une des publications aux *Comptes rendus*, « Propriétés de la zircone fondue au four solaire » [Trombe & al., 1951], met en évidence cette facette de leur travail. Préoccupés par les réfractaires, les auteurs ont fondu sous très haute température – grâce à l'énergie solaire – de la zircone frittée (dont la température de fusion est de 2680°C). Par « une fusion continue », ils obtiennent « des pièces céramiques réfractaires de plusieurs centaines de grammes », relativement pures, dont le comportement est modifié par rapport à la zircone initiale. Celle-ci subit, en effet, une transformation à haute température qui rend difficile une soudure comme le remarquait Chaudron au « XIV^e Congrès de Chimie Industrielle » à Paris, en 1934. Au contraire, les « pièces de zircone fondue présentent la remarquable propriété de pouvoir être soudées entre elles par une fusion locale identique à une soudure autogène. » Les auteurs veulent « rechercher l'origine » de cette différence. Pour ce faire, ils mènent deux études comparatives sur les formes frittée et fondue : l'une « dilatométrique » (variations de longueur en fonction de la température), l'autre électrique (« mesure de résistivité » en fonction de la température). Des dilatations différentes et une « anomalie électrique » – non encore signalée – sont ainsi quantifiées. De plus, les auteurs réalisent « des spectres Debye-Scherrer sur le produit fondu pulvérisé ».

Si le souci de fabriquer un composé nouveau (la zircone fondue) est premier, il n'en demeure pas moins que les auteurs cherchent à exhumer d'autres différences pour les propriétés mécanique (dilatation thermique) et physique (résistivité électrique). Mettre en évidence à l'aide de courbes quantifiées ces différences est ce qu'ils appellent « chercher l'origine [du] phénomène ». La caractérisation des propriétés physiques et mécaniques va de pair avec une étude cristallographique aux rayons X (sur poudres). Aucun lien explicite n'est pourtant donné entre la structure cristalline des deux composés (fritté et fondu) et les comportements macroscopiques différents. L'étude cristallographique est réalisée grâce à une collaboration avec le cristallographe Wyart, lui-même troisième auteur de la publication dont la contribution personnelle n'est cependant pas spécifiée.

En conclusion, l'analyse des publications de quatre des principales familles de chimie minérale permet d'établir un état des lieux épistémologique de l'étude des solides en chimie

³⁰ « Trombe avait été chargé par Urbain de préparer le gadolinium, ce qu'il réussit à faire. Par une étude magnétique, il s'aperçut que ce métal était ferromagnétique un jour et qu'il ne l'était plus le lendemain. En fait, il montra que son point de Curie est de 19°C. C'était le premier composé ferromagnétique en dehors de la famille du fer. Ensuite, Trombe étudia le dysprosium vers 1935. Cette découverte du ferromagnétisme des métaux de terre rare devait changer tout notre quotidien puisqu'elle a permis toute la miniaturisation des mémoires magnétiques. » [I Caro, 2005, p. 1-2].

vers 1950. La fabrication de nouveaux composés solides (inédits ou plus purs) est primordiale pour les minéralistes français. Les hautes températures permettent de synthétiser des oxydes et sulfures métalliques tandis que la chimie en solution conduit à des sels. Pour les hautes températures, les techniques sont diverses : four à arc électrique d'un côté pour Chaudron, Chrétien et Flahaut (hérité de Moissan), four solaire de l'autre pour Foëx et Trombe. Les méthodes de caractérisation sont multiples aussi. Chrétien favorise la réaction chimique, l'intuition du chimiste (aptitude à saisir la réactivité des composés) plutôt que les mesures physiques, qu'il tient à placer au second plan. Il choisit le macroscopique plutôt que le microscopique, le simple plutôt que le cher. Trombe et Flahaut (tous deux introduits par Lebeau aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*) se focalisent sur une chimie de la structure cristalline en usant des divers avatars de la diffraction des rayons X : Laue, cristal tournant, oscillant, poudres, Debye-Scherrer. Ce faisant ils se rapprochent de la *Chaudronnerie*. Flahaut compare ses résultats aux chimies de référence : analytique, organique, en solution, allemande. Trombe et Foëx se portent ailleurs et caractérisent les solides par leurs propriétés physiques : dilatométrie, résistivité électrique, spectroscopie. Ils collaborent avec un cristallographe, Wyart (I.3.2) pour élargir leur compétence structurale et publient en commun avec lui. Chaque laboratoire possède sa méthode propre d'envisager les solides. Les différences sont telles qu'il conviendrait de parler de programmes de recherche locaux (voire d'« écoles de recherche » [Geison, 1981]) plutôt que d'un paradigme commun à la chimie minérale. La *Chaudronnerie* quant à elle se rapprocherait plutôt des conceptions de Trombe et Foëx : uniquement des solides, métaux et composés ioniques, hautes températures, études structurales et physiques. Contrairement à tous les autres, elle s'intéresse au mésoscopique* (ou microscopique) comme le font les métallurgistes, intéressés par les propriétés mécaniques. Flahaut et Trombe se retrouvent sur l'étude des sulfures de terres rares tandis que Chrétien rencontre les solides au hasard des sels en solution.

Ceux qui parlent d'une chimie minérale française « vieillotte » au sortir de la Deuxième Guerre mondiale se trompent sur au moins deux points. D'abord, il n'y pas « une » mais plusieurs chimies minérales en France au début des années 1950. Chaque famille, chaque école, chaque baronnie cultive son propre jardin. Deuxièmement, les pratiques ne sont pas aussi rudimentaires et traditionnelles qu'on a bien voulu le dire parfois. Certains chimistes caractérisent les solides par leurs couleurs ou leurs aspects macroscopiques mais d'autres sont en contact étroit avec les cristallographes, s'intéressent aux mesures physiques et analyses structurales de rayons X. Les quatre familles envisagées jusqu'à présent (*Chrétienté*, *Chaudronnerie*, Trombe et Foëx, Picon et Flahaut) suffisent à montrer la diversité des pratiques et à repousser l'idée d'une chimie minérale unique – qui serait vieillotte – et duale – partagée entre *Chrétienté* et *Chaudronnerie* –.

III.2.2. Uniformiser les pratiques en une matrice disciplinaire unique (1980)

Le récit légendaire stipule que vers 1980 la chimie du solide est bien en place. Je vais essayer d'en cerner la matrice disciplinaire à cette époque. On peut par exemple la trouver parmi les discours des dominants de la communauté. Or, au début des années quatre-vingt, trois *solidistes* ou chimistes du solide ont déjà rejoint l'Académie des sciences comme correspondants. À l'occasion de leur élection, deux d'entre eux ressentent même le besoin de

préciser ce qu'est la chimie du solide dans la *Notice des titres et travaux scientifiques*. Une lecture attentive de leur notice donnera une première vision de la matrice disciplinaire : Paul Caro et Hagenmuller [1978] sont élus en 1978, Flahaut [1976] en 1983. Pour enrichir le discours, je m'appuierai aussi sur la notice de Collongues [1979] rédigée à la même époque. Cette analyse de discours officiels constitue le pendant de l'analyse des textes parce que chacun des quatre personnages est l'héritier d'une des familles (III.2.1) : Caro est élève de Trombe, Hagenmuller de Chrétien, Flahaut de Picon, Collongues de Chaudron. Le quatuor offre donc une vision de dominants. N'est-ce pas justement cela la « matrice disciplinaire » [Kuhn, 1970] ? Un énoncé méthodologique porté par les dominants d'une communauté.

Le choix de la date de fin 1980, peut se justifier de diverses manières. Je l'ai choisie parce que c'est le moment où l'institutionnalisation de la chimie du solide s'achève comme on le verra grâce à l'approche historique (III.4). Reconnue par le système universitaire et le CNRS, la chimie du solide voit ses premiers membres entrer à l'Académie des sciences. Même si cette entrée massive sous la coupole du quai Conti est une conséquence de la réforme des statuts qui ouvre plus largement l'Académie à des membres « correspondants », il n'en reste pas moins que la chimie du solide est distinguée par l'institution académique. Ce moment marque, à mon avis, l'ultime étape de l'institutionnalisation de la chimie du solide en France et de sa reconnaissance disciplinaire. Il est donc propice pour un bilan.³¹

Dans la notice qu'il soumet à l'Académie en 1976, Flahaut définit la « chimie de l'état solide » dans une perspective historique nationale. « Branche » de la chimie minérale, la chimie de l'état solide associe un intérêt pour la « préparation et [le] comportement chimique des matériaux » à « un examen approfondi des propriétés physiques des composés qui permet d'envisager d'éventuelles applications. » Par les collaborations auxquelles ces études « oblig[ent] », le chimiste du solide doit « sortir de sa stricte compétence pour pénétrer dans le domaine du physicien » sans oublier qu'il « est avant tout chimiste », occupé « à résoudre les problèmes chimiques fondamentaux, tels que celui de la nature de la liaison. » [Flahaut, 1976, p. 7-8].

Dans le dossier Paul Caro de l'Académie, je n'ai pas trouvé de notice. Par conséquent, je ne dispose pas de sa propre définition de la chimie du solide, à ce moment-là.

L'introduction de la notice de Hagenmuller – qui lui permet d'être élu correspondant en 1978 – précise quant à lui une définition de la « chimie du solide ». Comme pour Flahaut la définition se veut historique mais contrairement à lui, l'accent est mis sur la dimension locale – et non pas nationale –. En effet, Hagenmuller échafaude sa définition en suivant les évolutions temporelles des travaux de son laboratoire bordelais. D'abord « vouée surtout à la préparation et à l'identification de composés nouveaux », la chimie du solide s'oriente vers un objectif « d'ordre cristallographique » puis vers « le problème de la liaison chimique »*. Par la suite, « l'étude des relations entre structures et propriétés physiques » devient primordiale avec l'arrière-pensée d'atteindre « un caractère prévisionnel ». D'autre part, le chimiste

³¹ 1978 est pour l'Académie des sciences française une année de réforme des statuts qui en facilite l'accès. Pour la chimie, les « membres », qui jusque-là étaient six, voient leur nombre s'accroître : ils sont treize en 1997. D'autre part, la création du statut de « correspondant » augmente considérablement la population de l'Institut : pour la chimie, ils sont 32 correspondants en 1997 [ADS, 1997]. L'élection comme correspondants en 1978 de deux *solidistes* ne correspond donc pas vraiment à un raz-de-marée quai Conti mais bien à une reconnaissance de l'aristocratie chimique vis-à-vis de la nouvelle discipline. D'autre part, ce n'est pas un hasard si la plupart des *Notices de titres et travaux scientifiques* de chimistes du solide de la première génération datent aussi de la fin des années 1970 : Flahaut [1976, 1982, 1983], Hagenmuller [1978, 1988], Collongues [1979]. Elles ont été écrites, de manière plus ou moins avouée, en vue d'une présentation à l'Institut. En d'autres termes, ces représentants éminents de la chimie du solide sont conscients qu'une entrée à l'Institut est devenue possible parce que la discipline est désormais suffisamment reconnue. Une nouvelle fois, objets d'étude et sources interfèrent.

travaille à « la mise au point de matériaux à vocation économique déterminée. » [Hagenmuller, 1978, p. 1-2].

Contrairement à Flahaut et Hagenmuller, Collongues adopte une démarche a-historique : il définit la « chimie des matériaux » dans l'absolu puis y agrège son travail personnel. Laconiquement, il donne une définition très ramassée de la chimie des matériaux, « l'étude de la double relation : Structure → Propriétés → Applications des Matériaux Solides » mais il précise sa pensée ensuite : « Le point de départ d'une telle étude est naturellement le Cristal Parfait. Son aboutissement est le Matériau réel résultant de l'introduction dans le cristal parfait d'imperfections de toute nature (désordres de position ou de répartition, lacunes, dislocations, défauts de stœchiométrie, etc...). » [Collongues, 1979, p. 10].

Ainsi, malgré des différences de formulation – historique ou absolue –, les trois orateurs offrent une définition convergente de leur discipline : synthèse de nouveaux solides minéraux, étude de leurs propriétés cristallochimiques ou structurales, caractérisation de leurs propriétés physiques, applications industrielles potentielles. Les trois définitions insistent sur les liens (cognitifs) entre la constitution chimique et les propriétés cristallines (cristallographiques et physiques) des solides. Soit ils insistent sur la liaison chimique (Hagenmuller et Flahaut), soit ils postulent à la relation structure-propriétés (Collongues, Hagenmuller). Toutes les définitions se rejoignent autour de la nécessaire application des solides comme « matériaux », c'est-à-dire des composés réels, utiles pour l'industrie et la société en général. Ces énoncés communs aux trois acteurs constituent, selon moi, la « matrice disciplinaire » de la chimie du solide à la fin des années 1970. En effet, il semble que les trois acteurs soient relativement d'accord même si chacun développe en plus des thèmes plus personnels : nécessaire primauté de la chimie malgré une ouverture vers la physique (Flahaut), nécessité de parvenir à des prévisions structurales a priori en fonction des propriétés recherchées (Hagenmuller), importance de la notion de défauts ou impuretés pour les solides réels (Collongues). Chacune des spécificités individuelles n'est pas vraiment reprises par les deux autres. Est-ce à dire qu'elle n'est pas cruciale pour la matrice disciplinaire ou que les deux autres sous-entendent la formulation du troisième ? Question que je laisse en suspens pour le moment.

À la fin de cette réponse épistémologique, que conclure vis-à-vis du récit légendaire ? Premièrement que la matrice disciplinaire, mise en évidence pour 1980, correspond bien à la définition de la chimie du solide que donne le récit légendaire (III.1.1). Rien d'étonnant à cela puisque les témoignages qui ont édifié la légende sont issus des mêmes personnes : Hagenmuller, Flahaut, Trombe et Collongues (cité par [Cornet, 1989]) ou proviennent de leurs descendants (pour la plupart). Le récit légendaire définit pour la chimie du solide une matrice disciplinaire. Deuxièmement, la réponse épistémologique affaiblit l'opposition duale et symétrique entre *Chrétienté* et *Chaudronnerie* vers 1950. Au début des années cinquante, le travail de Chrétien et de tous ses élèves est d'abord centrée sur les solutions liquides et, de manière annexe, il touche les sels. Pour l'étude des solides en chimie, c'est la *Chaudronnerie* qui mène la danse en France sur les composés métalliques et minéraux (II.2). Si certains héritiers de Hagenmuller veulent insister sur la rupture épistémologique qui distinguerait un avant et un après Hagenmuller, ils ont peut-être partiellement raison pour la *Chrétienté* mais font fausse route s'ils pensent à l'ensemble des chimistes. La « modernité » de Hagenmuller ne serait alors qu'une innovation locale, au sein de la famille qu'il renie. En comparant avec soixante ans de recul les méthodes de la *Chaudronnerie* après-guerre (mais aussi de Trombe) et la matrice disciplinaire de la chimie du solide trente ans en 1980, on est frappé par une ressemblance. L'hypothèse est donc plutôt que la « chimie métallurgique » de Chaudron a très

tôt développé une partie de ce qui est devenu la norme épistémologique vers 1980. Elle devra être confrontée à l'analyse historique (III.4). Le rôle que Collongues a joué se trouverait alors nettement minimisé par rapport au personnage visionnaire de la légende qui aurait seul transposé les acquis de la métallurgie à la chimie minérale.³²

Que conclure enfin sur l'évolution épistémologique engendrée par les trente années (1950-1980) considérées ? En se focalisant sur quatre familles dominantes de 1950 et en comparant leurs travaux à trente ans d'intervalle, on met en évidence un mouvement convergent. Initialement, le spectre épistémologique est très large, les centres d'intérêt multiples : synthèse, réactivité, mécanismes, purification, haute température, caractérisations structurales ou physiques, et les méthodes variées : intuition, observation ou mesures thermodynamiques, optiques, mécaniques, physiques, cristallographiques, chimiques (III.2.1). Trente ans plus, l'énoncé méthodologique est beaucoup plus ramassé et ordonné : appliquer au solide la double relation structure-propriétés (par la liaison chimique) et propriétés-applications (par une ouverture vers l'industrie). Les pratiques éparses sont devenues dogme commun. Du point de vue psychologique, il est symptomatique que ceux qui aspirent à rejoindre l'Académie des sciences se sentent obligés de donner leur propre définition de la chimie du solide. Du point de vue historique, il est important que ce sentiment s'exprime à la fin des années soixante-dix et non pas en 1960 [Hagenmuller, 1960] ou durant les années 1980 [Flahaut, 1983], comme si c'était le moment précis de fixer une définition et de marquer un territoire nouveau. Chaque définition n'emploie pas le même terme : la première évoque la « chimie de l'état solide », la deuxième la « chimie du solide », la troisième la « chimie des matériaux ». Pourquoi trois expressions différentes ? Sont-elles associées à des entités sociales différentes ou répondent-elles seulement à une formulation personnelle ? Plus généralement, comment traduire le passage d'une hétérogénéité initiale (II.1.1) à une uniformisation épistémologique (III.2.2) ? Que sont devenues les multiples strates sociales (II.1) : familles, groupes thématiques, réseau, qui correspondaient aux années quarante ? La famille scientifique en particulier – qui distinguait aussi bien des pratiques différentes en 1950 – pourrait avoir perdu sa pertinence quant à une méthode commune. Quelle organisation nouvelle est venue la bousculer ? Kuhn [1970] associe la « matrice disciplinaire » à une « communauté scientifique ». Si, en 1950, il n'y a pas pour la chimie de communauté homogène qui étudie les solides mais des strates socio-cognitives imbriquées, il se pourrait que les choses aient changé. La convergence vers une norme d'étude commune le suggère. C'est aux réponses sociologique (III.3) et historique (III.4) de clarifier ces différents en mettant en évidence de nouveaux mécanismes sociaux et historiques à l'œuvre.

III.3. La quantification du discours : indices d'une communauté émergente (réponse sociologique)

³² Les héritiers des deux tendances (Hagenmuller et Collongues) s'entendent sur ce point : « Collongues avait été choisi par Chaudron pour transférer à la chimie minérale les concepts de la métallurgie [...] Chaudron et Bénard avaient lancé Collongues sur cette frontière entre métallurgie et chimie minérale pour essayer de moderniser la chimie minérale. » [I Pouchard, 2004, p. 1]. « L'idée de Chaudron quand il a donné son sujet de thèse à Collongues, c'était de transposer aux oxydes qui se formaient par interaction entre les métaux et l'atmosphère, les techniques de métallurgie qui étaient bien au point avec les concepts de défauts, les concepts de structure, etc. » [I Vivien, 2004, p. 4].

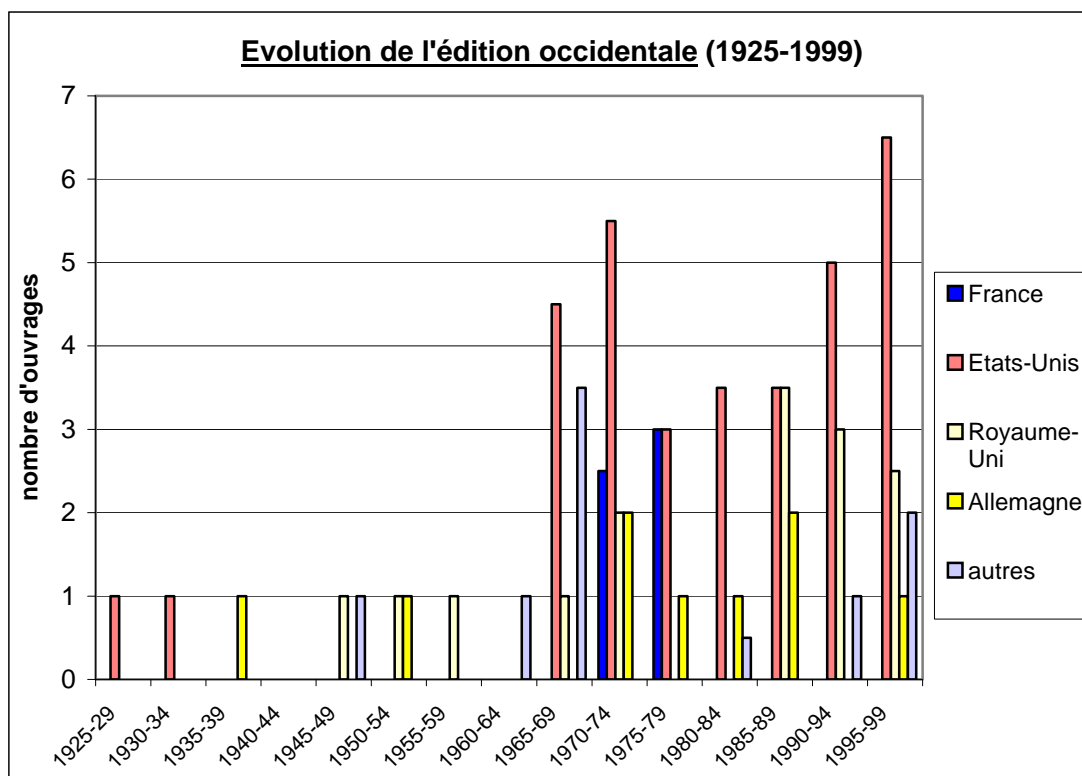
III.3.1. Tendances générales du siècle occidental

Avant de me focaliser sur l'espace national (III.3.2), je trace quelques évolutions liées à la « chimie du solide » en Occident, la France étant alors un pays parmi d'autres. Pour ce faire, j'ai constitué des bases de données au cours du temps en me focalisant sur quatre pays occidentaux : Allemagne, États-Unis, France et Royaume-Uni.³³ Le choix est certes motivé par des considérations linguistiques mais surtout parce que ce sont les pays les plus souvent cités par les témoignages et par les documents institutionnels. À partir des bases de données, j'ai défini des indices susceptibles de varier sur la période considérée puis j'en ai suivi l'évolution sur plusieurs décennies au cours du vingtième siècle. La fiabilité de la démarche sociologique dépend en grande partie de celle de la base de données. Or, comme elle n'est pas assurée, la conclusion du chapitre mettra les évolutions quantitatives en regard de considérations qualitatives (III.2, III.4).

III.3.1.1. L'édition d'ouvrages, un indicateur de projets personnels (1925-2000)

Même si éditer un ouvrage repose sur travail collectif, il est souvent issu d'un projet personnel. Suivre la production littéraire – par les titres d'ouvrages – permet donc d'estimer une somme de comportements individuels plutôt qu'une construction collective. La réalisation de ces projets personnels présuppose néanmoins l'existence d'un public prêt à accueillir l'ouvrage. Le diagramme ci-dessous décompte, pour chaque pays et par tranche de cinq ans, le nombre d'ouvrages édités liés à la chimie du solide (à travers les mots-clés de la note précédente). Il trace donc une évolution de l'édition d'ouvrages généraux en fonction des quatre pays sélectionnés.

³³ La bibliographie a été réalisée au cours des années 2006 et 2007 grâce aux moteurs de recherche des sites Internet des bibliothèques nationales de l'Allemagne (de l'Ouest) (*Deutsche Nationalbibliothek*), des États-Unis (*Library of Congress*), de la France (Bibliothèque nationale de France), du Royaume-Uni (*National Library*), et du système de documentation universitaire français SUDOC. L'influence suédoise est perceptible – surtout au début de la période – au travers des textes allemands. Les bases de données sont construites grâce aux mots-clés suivants « chimie du solide », « *solid state chemistry* », « *chemistry of solids* », « chimie des matériaux », « *chemistry of materials* ».

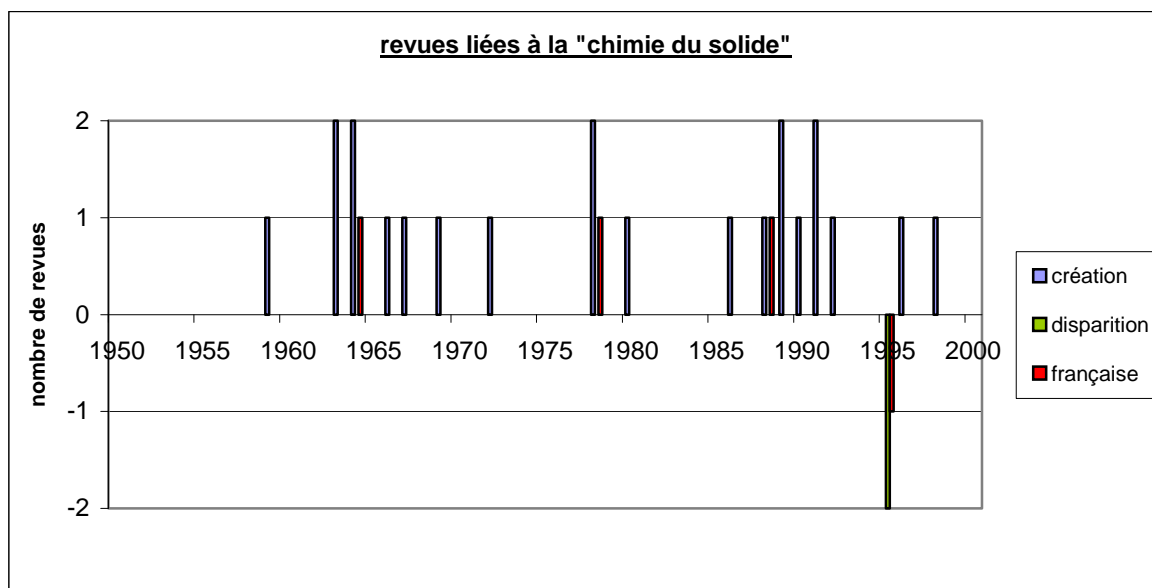


On distingue deux périodes nettement distinguées au cours du siècle : une première période lâche (1925-1965) durant laquelle la densité de publications est faible, et les ouvrages surtout édités en Europe (Royaume-Uni, Allemagne), ce qui correspond au réseau européen décrit pour la réactivité des solides (II.4). À partir de 1965, la fréquence d'édition augmente fortement et ce sont les éditeurs américains qui sont les plus productifs. Au sein de cet ensemble la productivité de chaque pays varie au cours du temps. L'édition française connaît une forte activité durant les années soixante-dix, ce qui peut suggérer une maturité de la communauté de chimie du solide à ce moment-là. Le Royaume-Uni édite beaucoup après 1985 seulement (à un moment où l'édition française est au point mort). L'édition allemande est assez stable tout au long du siècle (VIII.2.1.1). L'édition états-unienne est plus prolifique durant la décennie 1965-1974 puis au cours des années 1990. Quand on observe l'édition sur l'ensemble de la période, il est surprenant de voir que la base de données ne donne aucun ouvrage entre 1956 et 1963, juste avant le premier pic d'édition (1965-1974). Est-ce dû à un artefact bibliographique ou la période marque-t-elle une latence précédant l'explosion de la deuxième moitié des années 1960 ?

III.3.1.2. L'édition de revues spécialisées, la formation d'un public (1963-2000)

Contrairement à l'édition d'ouvrages, la création d'une revue est un acte éminemment collectif. La constitution du bureau d'édition nécessite d'abord un premier effort collectif, qui associe des individus autour d'un projet commun à long terme. Une telle aventure suppose surtout l'existence d'un public potentiel prêt à lire la revue chaque trimestre, chaque mois ou chaque semaine ainsi qu'une armée d'auteurs prêts à publier sur le thème sélectionné. Public et acteurs sont souvent les mêmes. Cette triple dynamique collective – administration, production, réception – est l'un des éléments importants qui distingue une « communauté

scientifique ». Tout à la fois, elle est indicateur de l'existence et acteur de la mise en place de la communauté.



Le diagramme indique trois vagues de créations de revues spécialisées ayant un rapport avec la chimie du solide, presque par salves. Le premier mouvement se dessine au cours des années 1960, plus précisément à partir de 1963. Certes, il s'inscrit dans une dynamique plus large, qui concerne les sciences expérimentales occidentales. En effet, de nombreuses revues spécialisées sont créées à ce moment-là, autour de 1960, pour répondre à des besoins plus spécifiques.³⁴ Néanmoins, la première vague de création (1963-1964) est cruciale pour au moins deux raisons. Premièrement, elle montre une convergence internationale des physiciens et des chimistes autour de l'état solide. L'année 1963 voit la création de trois revues associant physique et chimie. Pour l'étude des solides inorganiques d'une part avec *Journal of physics and chemistry of solids* et *Solid state communications*, mais aussi pour les solides organiques avec *Physics and chemistry of the organic solid state* (David Fox, Mortimer M. Labes et Arnold Weissberger). Ces trois revues portent une volonté multidisciplinaire d'étudier l'état solide qui comporte les minéraux mais aussi les composés organiques. Deuxièmement, en 1964, paraît une publication annuelle éditée par H. Reiss : *Progress in Solid State Chemistry* qui vise à établir chaque année un état des lieux des travaux en « *Solid State Chemistry* ». Cette initiative rend compte de l'existence d'un intérêt propre pour la chimie de l'état solide. Ainsi à un mouvement multidisciplinaire associant physique et chimie autour de l'état solide répond un mouvement spécifique, propre à la chimie, d'étude des solides minéraux. La suite des événements est moins cruciale. Un deuxième pic de publications, plus modeste, est visible à la fin des années 1970. C'est surtout à la fin des années 1980 que se dégage un troisième ensemble, plus conséquent en nombre. Enfin, au cours des années 1990, quelques revues disparaissent.

La plupart des revues, sont de langue anglaise, éditées au Royaume-Uni ou aux États-Unis. Elles rendent compte d'un développement international. Même si je me suis concentré sur quatre pays : Royaume-Uni, États-Unis, France et Allemagne, la dynamique semble plus large : ainsi une revue *Fizika i khimii obrabotki materialov* (*Physique et chimie des*

³⁴ Si on prend un autre exemple – celui de la catalyse –, les premiers journaux spécialisés sont créés à la fin des années cinquante et au début des années soixante : *Catalysis Review* (1958), *Kinetics and Catalysis* (1960), *Journal of Catalysis* (1962), *Surface Science* (1964). Ces informations m'ont été fournies par Baptiste Voillequin.

matériaux solides) est éditée à Moscou à partir de 1967. Elle intéresse les Américains puisque on peut la consulter à la bibliothèque du Congrès. La création d'une revue européenne de chimie du solide est plus tardive. Mais elle montre la volonté d'affirmer l'existence d'une communauté de chimie du solide en Europe, centrée sur la France et l'Allemagne, par opposition au monde anglo-saxon (VIII.2.1.3).

Comme pour les ouvrages, la contribution française n'est pas particulièrement marquante : les revues éditées en France participent au mouvement mais ne sont ni antérieures, ni plus nombreuses. Seulement trois revues éditées à Paris, d'abord en français – pour les deux premières – et qui ne sont pas, d'après les titres, expressément dédiés à la chimie du solide : *Revue Internationale des Hautes Températures et des Réfractaires* (1964-1995), *Science des matériaux*, nouvel appendice des *Annales de chimie* (1978), *European journal of solid state and inorganic chemistry* (1988-1998) qui devient *Solid state science* par la suite. La première revue, d'abord nationale (1964) puis internationale (1966), est lancée sous l'impulsion de Chaudron et renvoie à l'excellence de la chimie des hautes températures en France (V.1). Un nombre si restreint de revues éditées en France sous-évalue probablement le rôle effectivement joué par les Français dans le processus mais a le mérite de replacer l'espace national (souvent triomphaliste) à une place plus modeste sur l'échiquier international. L'influence éditoriale des *solidistes* français peut aussi s'exercer par une participation aux revues anglophones comme éditeurs correspondants ou associés.

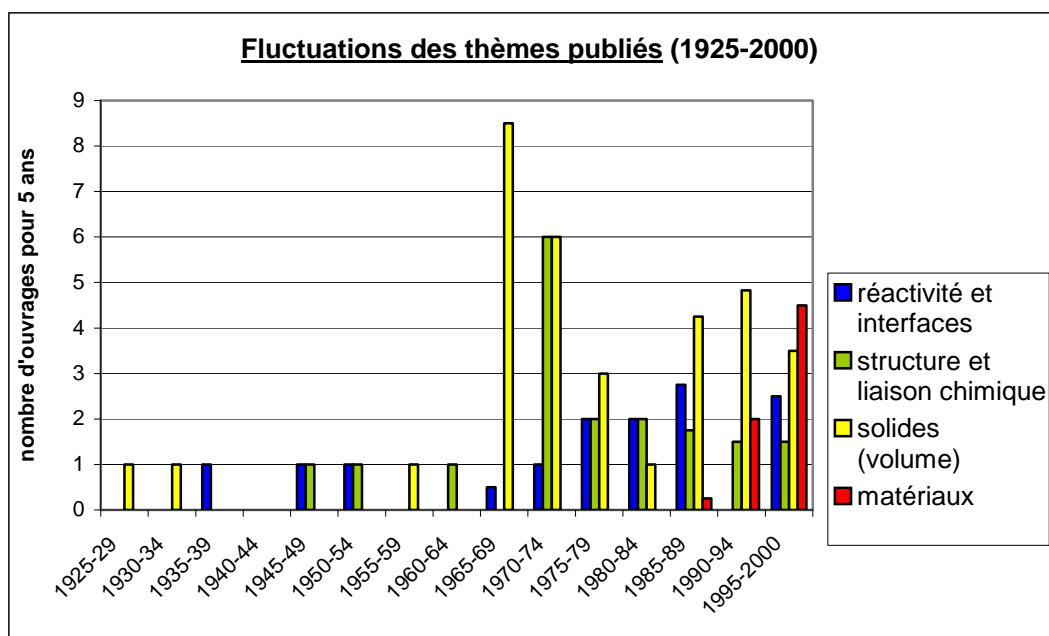
Une comparaison des ouvrages et des revues permet de donner une première conclusion sur la situation internationale. Les ouvrages sont publiés les premiers, à intervalle régulier entre 1925 et 1955. Les deux premiers ouvrages, dus à un métallurgiste britannique, Cecil H. Desch, portent les titres suivants : *The chemistry of solids* (1925) puis *The solid state chemistry* (1934). Malgré un titre générique, ils sont essentiellement tournés vers les métaux et les alliages, parfois non métalliques. Retrouver ici la métallurgie fait penser à la situation en *Chaudronnerie*, ce qui rapproche peut-être le cas britannique du cas français (VIII.2.1.2). Plus tard, au début des années 1950, l'expression « chimie du solide » est explicitement formulée comme titre d'un ouvrage en anglais. En 1948, elle l'avait déjà été en russe. L'interruption de l'édition d'ouvrages (1956-1963) cesse l'année où, justement, les revues périodiques commencent à être éditées. Paradoxalement, la période de creux éditorial correspond donc à une réorganisation des groupes sociaux, qui conduit bientôt à la formation d'un public international lisant les revues spécialisées. La France ne semble pas occuper une position privilégiée pour l'édition scientifique en chimie du solide. En revanche, c'est bien l'Europe (Royaume-Uni, Suède, Pays-Bas, France, Belgique) qui produit le plus pendant la décennie d'après-guerre (1945-1955).

C'est encore l'Europe – en particulier la *Chaudronnerie* – qui lance les congrès internationaux de « réactions dans l'état solide » qui se tiennent par la suite tous les quatre ans (II.4.2). Ce cycle de congrès n'est pas le seul à structurer l'espace social. À partir de 1978, se tient tous les trois ans une *European Conference on Solid State Chemistry*. Pourtant il n'existe pas d'équivalent au niveau international de conférences indépendantes portant sur la chimie du solide.³⁵ À partir de 1986, les États-Unis organisent tous les deux ans des conférences Gordon en « *Solid State Chemistry* » réservées à quelques dizaines de personnages, triés sur le volet. À partir de 1999, les « *Solid State Chemistry* » Gordon conférences se réunissent en Europe les années impaires. L'organisation de conférences internationales est donc postérieur à l'édition d'ouvrages et de revues spécialisées.

³⁵ Éventuellement, des conférences de chimie du solide sont intégrées aux cycles de l'*American Chemical Society* (ACS) ou de la *Materials Research Society* (MRS).

III.3.1.3. Évolution des centres d'intérêt

Afin d'affiner l'image de la chimie du solide au niveau international, on peut faire une analyse du titre des ouvrages. En distinguant quatre mots-clés : surface (et interfaces), volume, structure (et liaisons chimiques), matériaux, on obtient la répartition suivante au cours du temps.



La période 1938-1955 est principalement marquée par réactivité et les réactions dans l'état solide (III.4.1). Elle correspond à la mise d'un réseau européen de chimie de l'état solide, orchestrée par les Suédois, les Britanniques et les Français (II.4.2.). Aux questions de réactivité correspond un intérêt pour les structures cristallines. L'état solide est remplacé par les « solides », étudiés pour leurs propriétés volumiques (1965-1975). La période 1970-1985 est simultanément caractérisée par des tentatives d'explicitation de la liaison chimique et par un retour des questions de réactivité des solides. Au cours des années 1990, le label matériaux pénètre l'espace universitaire et vient progressivement remplacer la référence aux « solides ».

En conclusion, l'analyse quantitative des publications (ouvrage et revues spécialisées) pour quatre pays occidentaux a permis de repérer un mouvement global, international – par opposition à des dynamiques nationales –, dominé par les publications anglophones, surtout à partir des années 1960, lorsque le centre de gravité de l'édition effectue une translation du Vieux Continent vers le Nouveau Monde. La prise de pouvoir par les publications anglo-saxonnes correspond reflète une tendance générale de la recherche scientifique : la toute puissance de la science états-unienne d'après-guerre et l'établissement de la nouvelle *lingua franca* scientifique, l'anglais, qui balaye les autres langues vernaculaires – ici le français et l'allemand –. De manière plus spécifique pour l'étude des solides, l'analyse distingue trois périodes successives.

De 1925 à 1955, un réseau européen de chimie de l'état solide est en place, focalisé sur la réactivité des solides et les réactions dans l'état solide. Suédois, Français et Britanniques s'y distinguent. À partir de 1948, ce réseau s'incarne dans le cycle des congrès de « réactions dans l'état solide » (tous les quatre ans). La période suivante 1956-1975 est

marquée à ses début par une période de latence au cours des années cinquante, la recherche par mots-clés ne renvoie aucun ouvrage entre 1956 et 1963. Si on écarte l'hypothèse d'un artefact bibliographique, cette période révèle non pas l'absence de productions scientifiques mais une recomposition sociale du paysage occidental. L'hypothèse de la réorganisation est confirmée par une explosion des publications à partir de 1963 : création de plusieurs revues périodiques spécialisées (1963-1970), qui étaient absentes jusque là, et un renouveau dans l'édition d'ouvrages. Physique et chimie montrent à ce moment-là des velléités de rapprochement autour de l'état solide (organique et inorganique). Pour la chimie, la réorganisation s'accompagne d'une réorientation épistémologique vers la détermination structurale des solides minéraux (1965-1975) et, simultanément, d'une apparition récurrente de l'expression « chimie du solide » dans le titre des ouvrages. Ces quelques éléments convergent pour indiquer l'émergence d'une communauté indépendante de chimie du solide au niveau international (1963-1975). Durant la troisième période (1975-2000), l'espace communautaire continue de se structurer par l'organisation de congrès internationaux : européen à partir de 1978, Gordon conférences à partir de 1986 mais il ne se stabilise pas en mettant en place un cycle de conférences internationales et indépendantes, centrées sur la chimie du solide. Un virage cognitif vers la liaison chimique dans les solides marque la décennie 1975-1985. Si la communauté internationale ne se stabilise pas sur le « solide », c'est aussi parce qu'un nouveau mot-clé a pris le relais à la fin des années quatre-vingt. Jugé trop académique, trop symbolique de recherches cognitives, le solide est dépossédé de la place centrale qu'il occupe durant les années soixante-dix par les « matériaux », conçus comme des solides utiles. Désormais, le matériau répond mieux aux orientations appliquées d'une communauté universitaire imbriquée aux sphères industrielles (III.4.3).

Si l'analyse éditoriale a eu le grand mérite de mettre en évidence l'émergence d'une chimie du solide internationale, elle n'est pas adaptée pour donner un image fine de la communauté qui lui est associée, ni pour rendre compte des spécificités nationales. Tout en sur-évaluant les réalisations des deux pays anglophones (Royaume-Uni et États-Unis), elle sous-évalue la contribution européenne. Pour pallier ce déséquilibre, je vais concentrer mes efforts sur une étude quantitative pour la France, non plus par la médiation de l'édition mais par celles des laboratoires universitaires.

III.3.2. L'espace national, un réseau de laboratoires en interaction

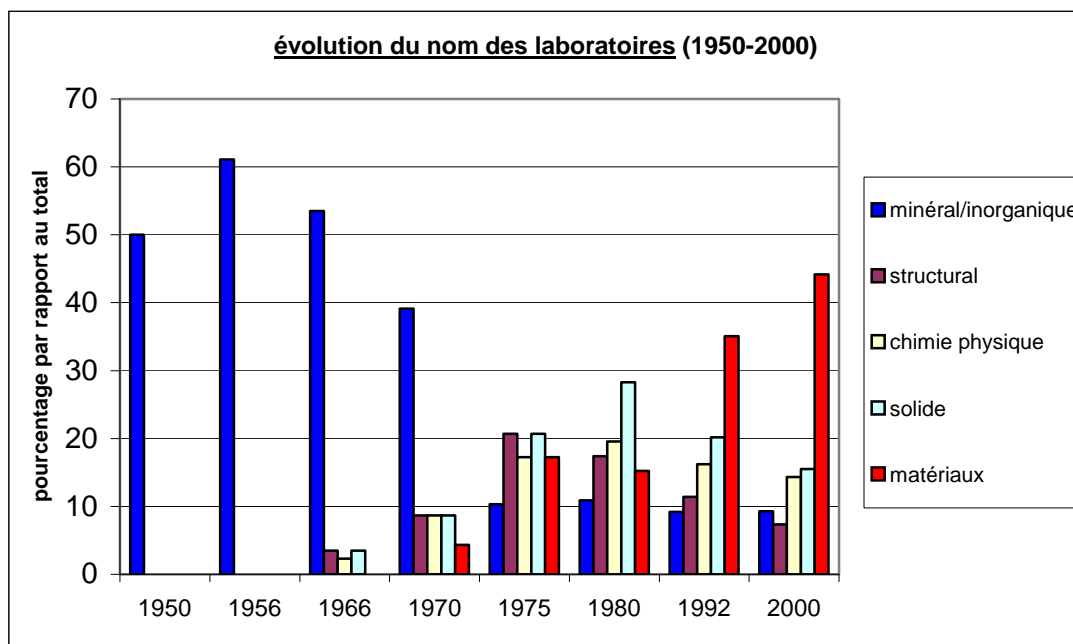
III.3.2.1. Évolutions toponymiques

Un laboratoire de recherche change de nom au cours du temps à de multiples occasions : regroupement avec une autre entité, changement de directeur, déménagement, rattachement à une nouvelle section du CNRS, contournement de la « loi des douze ans »... Quand on suit l'ensemble de ces changements locaux, on trouve des évolutions linguistiques globales. Le mouvement sémantique rend alors compte d'une réorganisation sociale, d'une évolution communautaire. J'ai donc fait un inventaire des laboratoires de chimie (pour la plupart) impliqués dans l'étude des solides.³⁶ Cet inventaire, fourni dans l'annexe A.III.1,

³⁶ Une telle démarche a quelque chose d'artificiel dans la mesure où l'inventaire repose sur une double sélection : d'un côté, j'ai choisi les laboratoires de proche en proche en observant la communauté universitaire des années cinquante (chapitres I et II), de l'autre, je me suis basé sur les témoignages des acteurs entre 2004 et 2007. L'inventaire engage donc un choix a priori (avant la formation de la communauté) et a posteriori (après sa formation).

rassemble beaucoup d'informations : nom des laboratoires, les directeurs successifs, la ville d'implantation (qui sert de critère de rangement), les spécialités, les liens familiaux et parfois les effectifs, mais n'est pas synthétique. Il servira de base pour la plupart des études statistiques suivantes.

En lisant le nom des laboratoires, on peut repérer diverses catégories : chimie « minérale », « structurale », « physique », du « solide », des « matériaux ». En calculant la répartition des laboratoires à différentes dates (imposées par les sources), on obtient l'évolution suivante. La quantité de laboratoires dans chaque catégorie est indiquée en pourcentage (pour l'année).



Jusqu'au début des années 1960, la majorité (60%) des laboratoires liés aux solides se range en « chimie minérale », ce qui confirme l'analyse disciplinaire du début (II.1.1.2). En cumulant chaque catégorie, on est loin de 100% parce que les autres sont des laboratoires de « chimie » (générale, appliquée ou simplement chimie), de métallurgie ou de hautes températures (chapitre II). En 1963, un premier laboratoire, celui de Rohmer (élève de Chrétien) à Strasbourg, prend le nom de « chimie minérale structurale ». C'est surtout lors de la création par le CNRS des laboratoires associés en 1966 que quelques laboratoires (8%) changent de nom en mentionnant désormais l'aspect physique, structural ou l'étude du solide. À cette occasion, pour la première fois en France, l'expression « chimie du solide » désigne deux laboratoires : « Métallurgie et chimie du solide » (laboratoire associé) à Nancy et « Chimie du solide » (équipe associée, Flahaut) à la faculté de pharmacie de Paris.³⁷ Même s'il est remanié au bout de deux ans (après Mai 68), et si l'association est plus institutionnelle que scientifique, le laboratoire de Nancy constitue une expérience inédite à la croisée de trois traditions : « chimie métallurgique » (*Chaudronnerie*), chimie minérale (famille Hackspill) et

³⁷ En fait, il existe déjà un laboratoire de « chimie des solides » avant 1960, à la Sorbonne. Il est dirigé par Jean Amiel et s'occupe essentiellement de chimie des interfaces et de catalyse. À Nancy, le nouveau laboratoire associé « Métallurgie et chimie du solide » est issu de la fusion de trois laboratoires préexistants : « Métallurgie » (René Faivre, élève de Chaudron), « Chimie minérale industrielle » (Albert Hérold, élève de Hackspill) et « Chimie minérale » (Jacques Aubry, collaborateur de Néel). Le laboratoire de la faculté de pharmacie, dirigé par Flahaut (III.2.1.2), est seulement une « équipe » associée à cause d'une taille trop modeste.

magnétisme de Strasbourg.³⁸ En 1970, les laboratoires estampillés chimie minérale sont toujours les plus nombreux (40%) mais les trois autres catégories continuent de croître à près de 10% chacun. Entre 1970 et 1975, la chimie minérale devient minoritaire (10%) tandis que les quatre autres catégories atteignent près de 20% : structural, physique, solide et matériaux. La rhétorique « solide » atteint son pic absolu en 1980 à seulement 28% – au moment où les premiers solidistes entrent à l'Académie (III.2.2) –. En 1992, c'est au tour des matériaux de prendre de l'importance (35%) au détriment du solide et du structural. Tendance qui se confirme en l'an 2000 lorsque la « chimie des matériaux » atteint un maximum à 45%.

Ainsi, partant d'une base essentiellement minérale durant les quinze premières années 1950-1965, les laboratoires de la communauté diversifient leur appellation à la fin des années soixante. Le milieu des années soixante-dix est marqué par un équilibre entre quatre dénominations. L'énoncé « chimie du solide » semble l'emporter vers 1980 (près de 30%) mais il est finalement noyé par la vague « matériaux » des années quatre-vingt, quatre-vingt-dix.

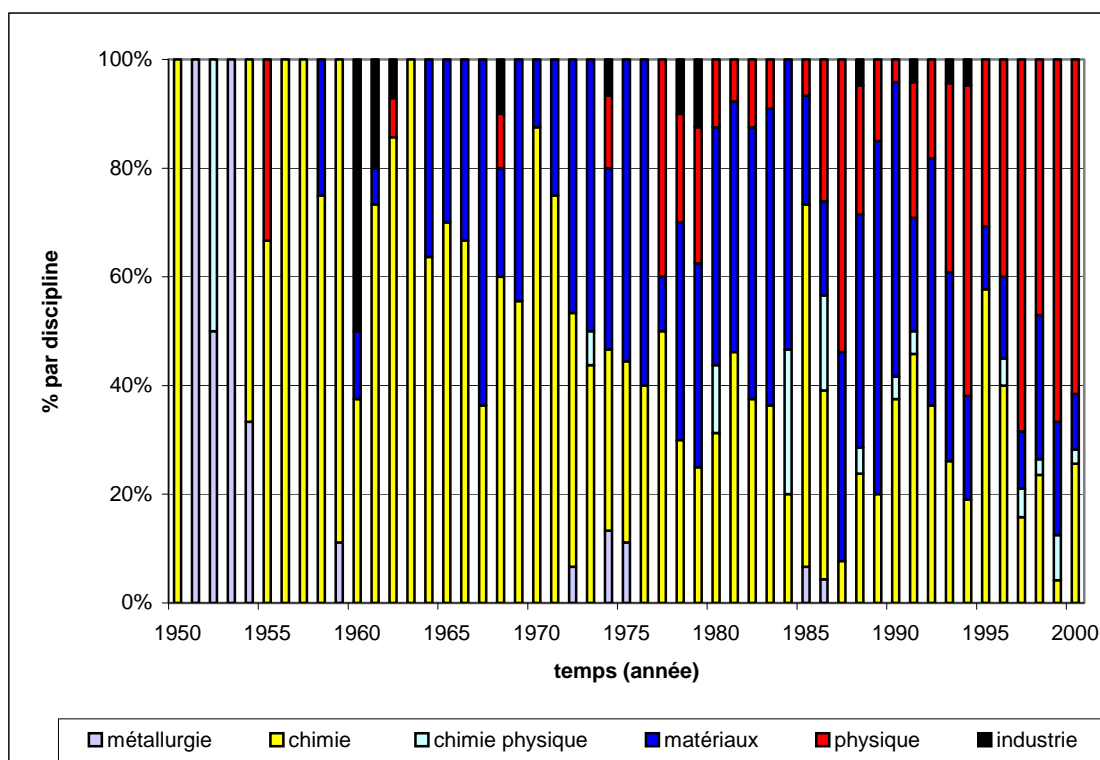
III.3.2.2. Évolutions épistémologiques : de la synthèse chimique aux caractérisations physiques

Parallèlement au glissement sémantique s'opère une modification du travail effectif des chimistes.³⁹ L'évolution des journaux cibles dans lesquels ils publient en témoigne. Pour montrer une tendance générale, je me suis concentré sur un seul groupe : l'équipe de recherche dirigée par Collongues.⁴⁰ Il présente plusieurs avantages : couvrir l'ensemble de la période, être considéré comme l'un des meilleurs de la communauté, c'est-à-dire d'être représentatif, avoir des sources institutionnelles facilement accessibles. En classant les journaux cibles suivant les catégories : métallurgie, chimie, chimie physique, physique, matériaux, industrie, j'obtiens le diagramme suivant :

³⁸ « les entités avaient peu de liens entre elles, les sujets étaient différents. L'équipe de Jacques Aubry faisait une chimie du solide plus classique : d'un côté oxydes, sulfures, azotures... ; de l'autre ciments et liants (qui sont aussi des oxydes). Les métallurgistes, avec René Faivre, travaillaient plus sur les alliages métalliques, les superalliages pour turbines ou réacteurs. L'équipe de métallurgie nous a rapidement quittés parce qu'après Mai 68, les écoles d'ingénieurs ont été séparées des universités, et les métallurgistes ont suivi l'École des Mines de Nancy. » [I Hérold, 2007, p. 7].

³⁹ Cette concomitance justifie a posteriori la pertinence de l'analyse toponymique. L'évolution du nom des laboratoires n'est pas purement rhétorique.

⁴⁰ Pour la période (1950-1954), il s'agit des publications de thèse de Collongues. Pour la période suivante (1955-1972), les données correspondent aux publications du service des hautes températures, que dirige Collongues au sein du CECM. Enfin pour la troisième période (1973-2000), je prend en compte le LCAES et l'équipe restée à Vitry-sur-Seine (Perez y Jorba) mais pas le laboratoire de Paris VI (Livage puis Clément Sanchez) [Teissier, 2006].



La cible des publications subit des déplacements successifs : d'abord métallurgiques durant la thèse de Collongues (1947-1954), sous l'influence directe de Chaudron, les articles sont publiés en chimie durant la décennie 1955-1964 : essentiellement *Comptes rendus* et *Annales de chimie*. Ensuite, au milieu des années soixante, ils obliquent vers des journaux plus spécialisés, comme ceux des matériaux. Durant vingt ans (1965-1985), les journaux matériaux accueillent la production de Collongues et son équipe tandis que ceux de chimie prennent une part de plus en plus faible. Cette période correspond à la création des revues spécialisées, internationales et anglophones, à partir de 1963 (III.3.1) et au déclin subséquent des revues généralistes et francophones, en particulier les *Comptes rendus*. À partir du milieu des années 1980, l'équipe propose de plus en plus sa production aux revues de physique qui les acceptent (1987-2000).

Même si elle est liée au programme de recherche d'un laboratoire spécifique (IV.3), qui à partir de 1979 effectue un virage important vers l'optique laser [Teissier, 2006], l'évolution observée est caractéristique d'une tendance plus générale, au sein de la communauté, vers la physique et les matériaux.⁴¹ À partir des années 1960, 1970, les *solidistes* français changent de revues, glissant des périodiques généralistes et francophones de chimie vers des éditions de langue anglaise, tournées vers les matériaux, la physico-chimie et la physique. L'évolution quantitative n'indique pas néanmoins si le public qui lit ces articles change au fil du temps sans que la revue elle-même change d'appellation.

⁴¹ Ma conviction repose sur l'énoncé de la matrice disciplinaire (qui ne mentionne même pas la synthèse chimique comme primordiale (III.2.2), sur des observations qualitatives pour d'autres laboratoires du même glissement vers la physique, sur le témoignage d'acteurs et enfin sur la « *physicalisation* » de la chimie [Reinhardt, 2006], qui concerne spécifiquement la chimie frontalière du type chimie du solide.

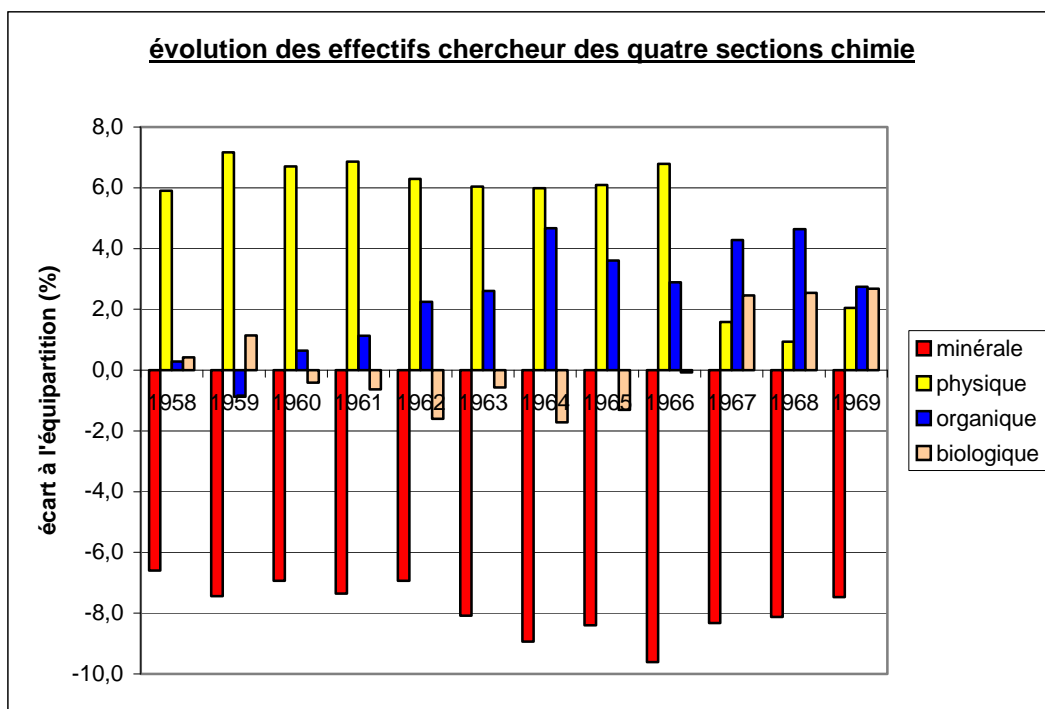
III.3.2.3. Migration ou réorganisation d'un espace (1958-1969) ?

L'annexe A.III.1 inventorie une quinzaine de laboratoires de chimie liés aux solides en 1956, une trentaine en 1960, trente-cinq en 1966 et une quarantaine à la fin des années soixante. Par la suite, leur nombre restera stable jusqu'à la fin du siècle. Cette stabilisation est antérieure à l'ensemble de la communauté universitaire qui, pour la chimie, a lieu vers 1980 [Lancianot-Morandat, 1999, p. 63]. En une décennie seulement 1956-1966, le nombre de laboratoires liés aux solides minéraux est quasiment multiplié par trois. Mais cette période correspond aussi à une forte croissance de l'Université : soixante mille d'étudiants avant-guerre, deux cent mille en 1960 et trois cent mille 1966. En 1960, les facultés des sciences accueillent un tiers des étudiants dont plus de deux mille doctorants en sciences physiques.⁴² La recherche universitaire elle aussi connaît une croissance exceptionnelle : les effectifs du CNRS passent de cinq mille trois cents en 1956 à plus de douze mille dix ans plus tard [Picard, 1990, p. 214]. Le budget du CNRS a fait plus que doubler entre 1953 et 1960 tandis que les dépenses des universités pour la recherche ont elles aussi crû énormément.⁴³ Même si le financement de la recherche universitaire est nettement inférieur à celui des recherches appliquées de l'État (d'un facteur six), elle fait désormais partie des préoccupations du Commissariat au Plan. *Les Échos* du 6 juin 1961 souligne que « la recherche scientifique constituera avec l'enseignement l'une des préoccupations premières des pouvoirs publics dans l'élaboration du IV^e Plan d'équipement et de modernisation. » [*Le Progrès scientifique*, 1961, n°8, p. 28]. L'expansion de la communauté des solides suit-elle le rythme général de croissance de la recherche universitaire ou est-elle plus rapide encore ?

Pour répondre à cette question, il serait intéressant de comparer la taille de la communauté des solides avec celle d'autres groupes de la chimie universitaire. En toute rigueur, ceci n'est pas possible, les limites d'une communauté étant soumise à caution. Néanmoins, la plupart des laboratoires impliqués, malgré leur changement de nom (III.3.2.1), appartiennent à la chimie minérale. En prenant le CNRS comme référence (seules sources globales disponibles), on peut tenter une comparaison des effectifs chercheur des quatre sections chimie : minérale, physique, organique, biologique, au cours des années 1960 [RA CNRS, 1958-1969]. Je vais donc tracer l'évolution des effectifs chercheur des quatre sections du CNRS au cours du temps. Pour présenter des croissances différentes d'une année sur l'autre, j'ai choisi l'équartition (25%) comme moyenne de référence.

⁴² « Effectifs des étudiants suivant les grades et diplômes poursuivis, au 30 juin 1960 (Métropole) ». Pour les facultés des sciences : 67627 dont DES : 481 (Sciences physiques), Ingénieur docteur : 446, Doctorat d'État : 1218, Doctorat université : 399. [*Le Progrès scientifique*, 1961, n°4, 11].

⁴³ En mai 1961 (numéro spécial), *Le Progrès scientifique* donne une « Evaluation approximative des dépenses de recherche en 1960 » : le CNRS affiche un budget total (salaires compris) de 248 millions de nouveaux francs (350 millions d'euros 2006). Ce chiffre est confirmé par [Picard, 1990]. Les dépenses des universités pour la recherche sont du même ordre de grandeur : 225 millions de francs (320 millions d'euros 2006). Les dépenses publiques de la recherche appliquée sont bien supérieures à celles de la recherche universitaire (d'un facteur six) : l'IRSID a un budget de 26 millions de francs pour six cents employés [*Le Progrès scientifique*, 1961, n°2] ; le CEA dépense 328 millions pour ses recherches (460 millions d'euros 2006), devant le CNRS mais bien loin derrière les dépenses militaires de recherche : « Etudes et prototypes militaires » : 1130 millions (1,6 milliards d'euros 2006) et les dépenses du privé : 1550 millions de nouveaux francs (2,2 milliards d'euros 2006).



Jusqu'en 1966, la section de chimie minérale décroît en valeur relative (18,5 à 15%) au profit de la chimie organique (25 à 28%) essentiellement. En 1967, le CNRS scinde la chimie physique en deux nouvelles sections, ce qui a pour effet de rééquilibrer partiellement les différentes sections. La chimie minérale en particulier revient autour de 17%.⁴⁴ Comment peut-on interpréter ces résultats pour les lier à l'expansion des solides ? Premièrement le CNRS n'est probablement pas tout à fait représentatif de la communauté universitaire (mais problèmes de sources). Ensuite, lier la chimie de l'état solide à la chimie minérale n'est pas absurde parce que, jusqu'à la fin des années 1960, la plupart des laboratoires de chimie de l'état solide (qui sont à l'université) font référence à la chimie minérale, et les patrons de ces laboratoires siègent au comité national de la section 12. Troisièmement, l'essor de la chimie du solide au cours des années 1960 (III.3.2.1) ne correspond pas à une augmentation spécifique du nombre de chercheurs. Toutes les sections croissent, celle de chimie minérale relativement moins que les autres. L'expansion de la chimie du solide n'est donc pas due à une migration massive en provenance des autres sous-disciplines mais à une réorganisation de la chimie minérale. Du milieu des années cinquante au milieu des années soixante, la chimie du solide exerce un attrait spécifique au sein de la chimie minérale, par exemple de la métallurgie ou de la thermodynamique. L'hypothèse que la chimie du solide se construirait sur la chimie physique n'est donc pas tenable.⁴⁵

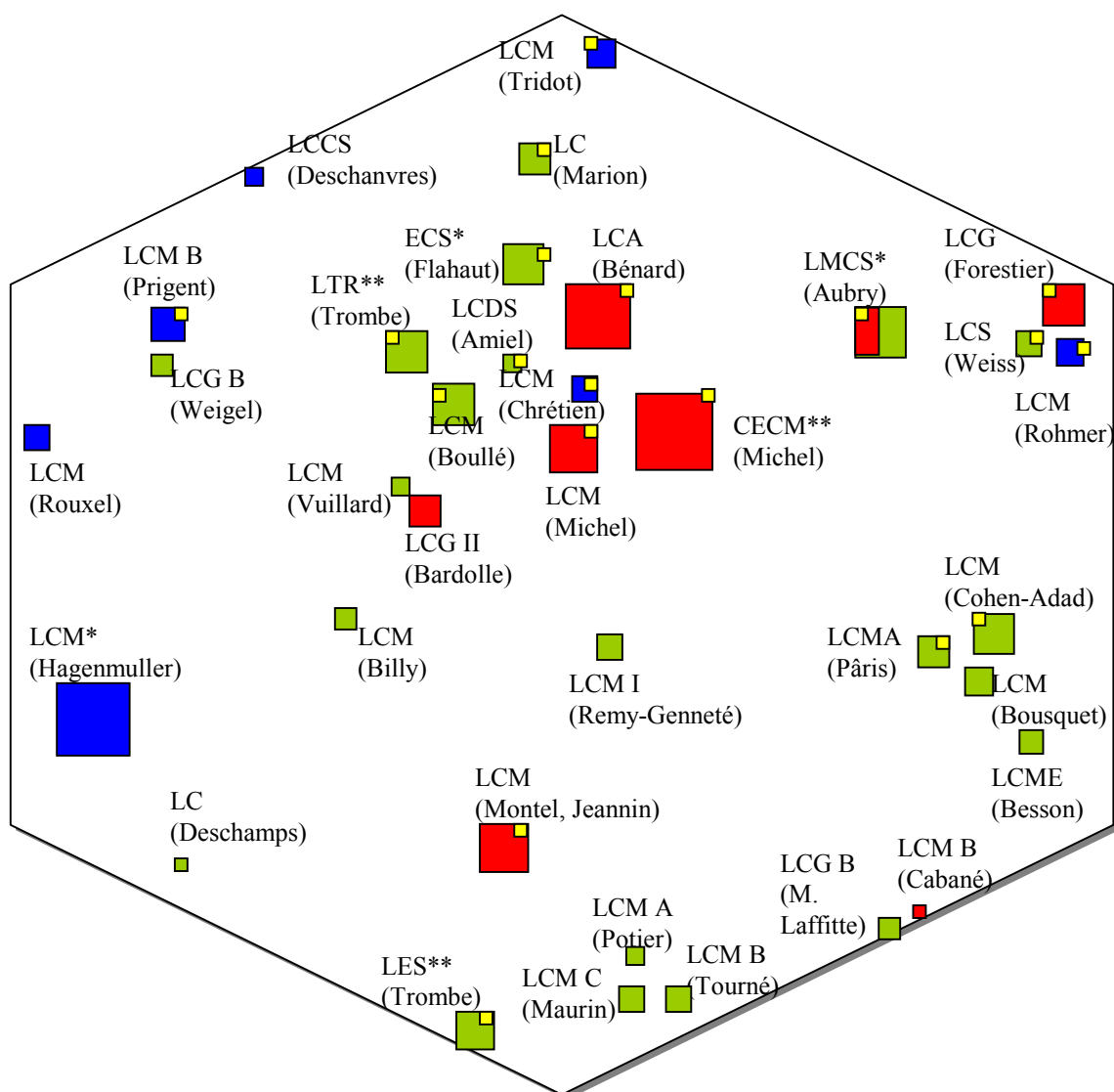
⁴⁴ Les deux nouvelles sections sont respectivement « physico-chimie atomique et ionique » et « physico-chimie moléculaire et macromoléculaire » [RA CNRS, 1967]. Pour tracer sur l'ensemble de la période, je somme les effectifs des deux nouvelles sections pour obtenir l'effectif de la chimie physique. Cependant, cette réorganisation introduit une rupture dans la série : la chimie physique perd 5% de ses effectifs ! De plus, cette scission s'accompagne selon [Lanciano-Morandat, 1999, p. 144] d'autres réarrangements de sections, ce qui affaiblit encore la notion de série homogène.

⁴⁵ « En chimie, par contre, l'opposition entre minérale et organique était transcendée par le développement plus récent de la chimie physique qui, avant guerre, avait tendance à couvrir le futur domaine des matériaux. » [I Friedel, 2001, p. 1].

III.3.2.4. Cartographie d'un réseau au milieu des années soixante.

En 1966, le ministère de l'Industrie publie un inventaire des laboratoires de *La recherche universitaire* [MIN, 1966]. Chaque laboratoire y fournit un certain nombre d'informations (effectif, activité, instruments) pour l'année universitaire 1963-1964. Pour la chimie, le rapport classe les laboratoires suivant plusieurs catégories : « physico-chimie de l'état », « chimie de la réaction », « chimie descriptive (minérale et générale), « chimie appliquée » et « chimie des matériaux ». Malgré une hétérogénéité des données collectées, il est possible de repérer les laboratoires de chimie de l'état solide et d'en dessiner une carte nationale. La carte fournie ci-dessous fournit une répartition géographique, démographique et familiale (*Chaudronnerie* par rapport à *Chrétienté*) du territoire français. Y sont mentionnés aussi le nom (sigles) des laboratoires, leur ancienneté (créé avant 1960 ou pas), leur taille (effectif des chercheurs et doctorants) ainsi que l'identité du directeur.⁴⁶

⁴⁶ Chaque laboratoire est représenté par un carré, dont la couleur désigne la filiation du directeur (*Chaudronnerie* en rouge, *Chrétienté* en bleu, les autres en vert), et dont l'aire est proportionnelle au nombre de chercheurs déclarés dans le rapport *La recherche universitaire en France. Tome III (chimie)* [MIN, 1966]. Le petit carré jaune marque les laboratoires qui existent avant 1960. Chaque étiquette désigne le nom du laboratoire et du directeur (entre parenthèses), « ** » indique un laboratoire propre du CNRS, « * » un laboratoire associé. Sigles par ordre alphabétique (ville indiquée entre parenthèses si le nom correspond à un seul laboratoire). CECM : Centre d'études de chimie métallurgique (Vitry-sur-Seine) ; ECS : Équipe de chimie du solide (Paris) ; LC : Laboratoire de chimie ; LCA : Laboratoire de chimie appliquée (Paris) ; LCDS : Laboratoire de chimie des solides (Paris) ; LCG : Laboratoire de chimie générale ; LCM : Laboratoire de chimie minérale ; LCMA : Laboratoire de chimie minérale et analytique (Lyon) ; LCME : Laboratoire de chimie minérale et électrochimie (Grenoble) ; LCS : Laboratoire de chimie structurale ; LES : Laboratoire de l'énergie solaire (Odeillo) ; LMCS : Laboratoire de métallurgie et de chimie du solide (Nancy) ; LTR : Laboratoire des terres rares (Bellevue). Un sigle peut être suivi d'une lettre ou d'un chiffre romain pour préciser, s'il y a plusieurs laboratoires de même nom dans la même faculté des sciences.



La carte ci-dessus repère et situe trente-trois laboratoires, ce qui correspond à une quarantaine si on distingue les deux laboratoires d'Odeillo (V.2), les trois laboratoires nancéens et les trois laboratoires rennais (VII.1.1). Les laboratoires, relativement bien répartis sur l'ensemble du territoire, regroupent environ trois cents chercheurs. On peut donc estimer la taille du réseau universitaire à six cents membres (si on double pour prendre en compte les techniciens). La plupart des laboratoires se réfèrent à la « chimie minérale » (III.3.2.1) et portent des noms très généraux. Par la précision de leur intitulé, le Laboratoire des terres rares ou celui de chimie des solides constituent des exceptions. La majorité des laboratoires sont répertoriés en « chimie descriptive » [MIN, 1966]. L'effectif moyen d'un laboratoire est proche de dix chercheurs et doctorants. Cette moyenne a peu de sens dans la mesure où leur taille peut varier de un professeur (Pau, Marseille) à quarante chercheurs (CECM). La région parisienne joue un rôle central par son ancienneté, la densité de laboratoires (20%) et de chercheurs (33%). Les régions Rhône-Alpes (Lyon, Grenoble) et Alsace Lorraine (Strasbourg, Nancy) constituent deux pôles anciens et dynamiques. La façade Ouest (Bordeaux, Nantes, Rennes) et le Sud-Est (Montpellier, Marseille) représentent des zones émergentes, de peuplement plus récent.

Au niveau des familles, la *Chaudronnerie* domine le paysage avec 30% des effectifs chercheurs. À lui tout seul le CECM représente 13% des chercheurs de la communauté. Le laboratoire Chrétien à la Sorbonne semble bien isolé à Paris. Cependant les élèves de Chrétien ont commencé à coloniser les villes de province : Rennes, Lille, Caen, Strasbourg, Bordeaux, Nantes. La *Chrétienté* se déploie en province pour contourner la densité parisienne (*Chaudronnerie* et familles Trombe et Flahaut). La taille du laboratoire bordelais avec ses trente-trois chercheurs est impressionnante si l'on considère qu'il n'a été créé que quatre ans auparavant, en 1960-1961 (IV.4.1).

L'analyse sociologique apporte deux informations majeures. Premièrement, le mouvement de construction de la chimie du solide est international : d'abord constitué d'un réseau européen sur les questions de réactivité des solides (1945-1955), il s'internationalise (Est et Ouest) au cours des années 1960. Les États-Unis en particulier investissent la sphère de l'édition scientifique (ouvrages et revues) et participent aux congrès. Les études éditoriales suggèrent une dynamique multidisciplinaire (physique et chimie) et une instabilité communautaire (glissement du solide aux matériaux) mais ne sont pas assez précises pour décrire l'organisation de la communauté sur laquelle je reviendrai par la suite (III.4.3, VIII.2). Deuxièmement, la France, qui s'inscrit dans le mouvement international, présente une dynamique spécifique. Tout d'abord, plusieurs laboratoires de chimie minérale (1950-1965) se rapprochent pour former une communauté de chimie du solide de plus en plus structurée (1963-1980). Celle-ci, relativement instable, glisse au cours des vingt dernières années vers la chimie des matériaux (1980-2000). L'émergence de la communauté s'effectue, non par un transfert massif en provenance d'autres sous-disciplines (comme la chimie physique), mais par une réorganisation du territoire disciplinaire au sein de la chimie minérale (favorisée par un afflux de jeunes chercheurs) et une occupation du territoire géographique (dynamisme de la province). Les solides minéraux ont alors plus d'attrait que la thermodynamique ou l'étude des métaux. Cette évolution sociale s'accompagne d'une réorientation des pratiques de laboratoire : initialement centrée sur la réactivité chimique après-guerre, la communauté développe des synthèses chimiques vers 1960 tout en ayant de plus en plus souvent recours aux analyses structurales. Au cours des années soixante-dix, ce sont les propriétés physiques qui deviennent centrales. Enfin, la répartition géographique s'opère suivant de puissantes logiques familiales : la *Chaudronnerie* concentrée sur Paris et la région parisienne (mais aussi à Lille et Strasbourg) ; la famille Hagenmuller colonise l'Ouest dès les années soixante (Rennes, Bordeaux, Nantes) puis ailleurs (Marseille, Poitiers) ; le reste de la *Chrétienté* s'efforce de se placer au mieux (Sorbonne puis Rennes, Caen, Strasbourg), les familles Flahaut (ex-Lebeau) et Trombe cherchant des niches géographiques vacantes (facultés de pharmacie, Bellevue, Odeillo, Lyon) pour éviter le choc frontal avec les empires.

III.4. Du réseau de chimie de l'état solide à la communauté de chimie du solide (réponse historique)

Vers 1950, plusieurs disciplines universitaires étudient l'état solide avec des méthodes et des objectifs propres (I.3). Focaliser l'objectif sur l'une d'entre elle – la chimie – a permis de répertorier de groupes de chimistes aux prises avec les solides (II.1) : familles scientifiques (II.2), groupes thématiques autour d'instruments (II.3), ou sur une question chimique (II.4). Le récit légendaire, en favorisant une dualité trompeuse, masquait la multiplicité des solides

en chimie (III.1). La réponse épistémologique a montré que l'idée d'une rupture épistémologique était erronée. Elle a proposé au contraire un processus d'uniformisation des pratiques à partir d'un ensemble initial hétérogène (III.2.1). La « modernité » de la chimie du solide, que réclame le récit légendaire, ne se situerait pas dans la discontinuité mais dans la continuité. La modernisation de la chimie ne serait *in fine* qu'une normalisation épistémologique conduisant à une matrice disciplinaire (III.2.2). Cette matrice pouvait correspondre à une communauté scientifique pertinente. La réponse sociologique devait partir à sa recherche. Elle a extrait le processus historique du cadre de la chimie nationale pour le porter à un niveau international – ou du moins occidental – et multidisciplinaire, entre physique et chimie (III.3.1). L'analyse quantitative souligne l'importance des années soixante dans la formation d'une science expérimentale, internationale et spécialisée. D'autre part, elle a mis en évidence une dynamique nationale spécifique : partant de la chimie minérale, on passe, en France, d'une stratification sociale qui n'est pas agencée autour des solides (II.1), à une communauté de chimie du solide (III.3.2). Une nouvelle fois pourtant, l'analyse linguistique rappelle l'historien à l'ordre. L'expression « chimie du solide » n'est qu'une possibilité parmi d'autres : « chimie de l'état solide » ou « chimie des matériaux » traversent aussi le champ communautaire à divers moments de son développement. S'il est désormais acquis que la communauté est là, reste à savoir comme elle s'organise. Autour de quelles institutions et de quels rêves se construit-elle ? C'est la réponse historique qui va reconstituer la trame du récit et détailler le passage de la chimie de l'état solide (II.4.1) à la chimie des matériaux (II.4.3) en passant par la chimie du solide (II.4.2).

Raconter l'émergence d'une discipline comme la chimie du solide pose problème en raison des multiples acteurs et enjeux qui sont impliqués. Il faudrait être partout tout le temps, mais raconter, c'est cibler, choisir d'éclairer telle partie au risque d'en laisser d'autres dans l'ombre ; c'est chercher un enchaînement causal (ou du moins temporel) là où il peut très bien ne pas y en avoir. Chaque source ne livre que des fragments d'histoire. Le regard qui les assemble, le projet qui leur donne sens, le récit qui les convoque sont toujours des artifices. Pour raconter l'émergence de la communauté, j'ai donc dû imposer une unité de lieu : les institutions scientifiques françaises, une unité de temps : de 1950 à 2000, et une unité de méthode : chercher les évolutions (vie pratique, questionnement, méthodes). Deux institutions nationales ont particulièrement retenu mon attention par leur complémentarité : le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et la Société chimique de France (SCF).⁴⁷ Là encore, il fallait choisir car les sources n'étaient pas homogènes.⁴⁸ Suivant les sources disponibles, le récit historique commence à la Société chimique et se termine au CNRS.

⁴⁷ Pourquoi ces deux institutions suffisent à décrire le paysage national ? Le CNRS, en se distinguant de l'université française, parcellisée, constitue un ensemble cohérent, performant, de dimension nationale. Il peut ainsi servir de jauge pour évaluer la communauté de chimie du solide française. La SCF, sans être représentative de la chimie nationale, a vocation à l'être (au mieux, elle est porte-parole de ses adhérents, au pire bureaucratie peu légitime) et dessine ainsi une certaine image de la communauté des chimistes français. Elle constitue une entité cohérente, différente des institutions universitaires, avec moins d'enjeux de pouvoir : « elle [la Société chimique de France] était relativement œcuménique, dominée par personne je pense. » [I Caro, 2005, p. 18], et plus de mixité entre les générations ou les groupes : « Quand j'étais jeune, la SFC jouait un rôle important dans la mesure où les jeunes gens venaient présenter leurs travaux là. » [I Caro, 2005, p. 18].

⁴⁸ Le *Bulletin de la Société chimique de France* (BSCF) contient beaucoup d'informations sur la communauté chimique française au cours des années 1950 parce qu'il rend compte des séances de la Société. J'ai eu facilement accès aux *Bulletins*, au siège de la SFC, grâce à la gentillesse de ses permanents (merci en particulier à Madame Lavergne). Par la suite, durant les années 1960, le *Bulletin* perd cet intérêt lorsque les comptes rendus de séance disparaissent vers 1966-1968 pour devenir un simple organe de publication scientifique. Les comptes rendus des séances du conseil de la SCF (qui réunit le bureau de la Société) sont aussi accessibles entre 1963 et 1975 [SCF, 1963-1975]. Le mouvement est inverse au CNRS : les rapports, peu nombreux et centrés sur les laboratoires rattachés au CNRS durant les années 1950, s'étoffent par la suite et contiennent des informations

III.4.1. La chimie de l'état solide entre réactivité et composés non stœchiométriques (1948-1956)

III.4.1.1. Société chimique de France : radiographie du paysage national

À la Libération, la Société chimique de France (SCF) défend l'idée d'une chimie monolithique, sans spécialisation interne. Jusqu'en 1958, elle ne comporte pas de sections correspondant aux sous-disciplines universitaires [BSCF, 1946-1958]. Les communications orales de la Société sont ouvertes à tous les chimistes sans spécification disciplinaire. Le *Bulletin de la Société chimique de France* en revanche est plus sectionné. En 1944, le *Bulletin* dirigé par Georges Champetier⁴⁹ comprend trois « rubriques » : « chimie physique et chimie minérale », « chimie organique (et analytique) », « chimie biologique ». Cette classification, comparable aux sections CNRS de 1947, s'en démarque par deux réarrangements : chimies minérale et analytique, groupées au CNRS, sont ici respectivement associées aux chimies physique et organique. S'il y a consensus au CNRS et à la SCF pour repérer et nommer les mêmes sous-disciplines de la chimie, des divergences de regroupements s'établissent entre les deux institutions. Ceci suggère que les frontières sous-disciplinaires ne sont pas stabilisées puisque, à une époque donnée, elles changent quand on passe d'une institution à l'autre. Une telle volatilité souligne la contingence des classifications cognitives.⁵⁰ Dans la rubrique chimie physique et minérale, les articles sont répertoriés en plusieurs catégories à la manière des « spécialités » et « affinités » du CNRS (II.1.1.2).⁵¹ Aucune ne s'intitule « chimie du solide ». Ce n'est pas par manque d'intérêt : les quatre principales familles de minéralistes liés aux solides (III.2.1) collaborent au *Bulletin*, font partie de la direction de la SCF, voire la président.⁵²

Si son ossature institutionnelle est rigide, la Société en revanche est un lieu de vie sociale souple : on s'y parle, on s'y dispute, on s'y écoute, on y fait la sourde oreille, on y

intéressantes sur la communauté de chimie du solide en train de se former [RA CNRS ; RC CNRS]. Après 1980, ils perdent leur densité et se transforment en organes de communication : des plaquettes publicitaires assez creuses.

⁴⁹ Ancien élève de Urbain, Champetier dirige un laboratoire de chimie macromoléculaire à l'ESPCI et participe au comité de direction du CECM (II.2.2.2).

⁵⁰ Suivant la victoire antique des philosophies rationalistes (Platon, Aristote), la science occidentale présente souvent les classifications disciplinaires des découpages logiques et clairs d'un monde cognitif a priori. Le positivisme de Comte a durablement imposé l'idée d'un arbre de la connaissance et des branches nécessaires qui lui seraient associées. Ces découpages découlent aussi en grande partie de victoires institutionnelles a posteriori et de négociations privées dans les salons publics qui se répercutent dans l'enseignement.

⁵¹ Dans les quatre numéros du *Bulletin* de 1944, on trouve dans la rubrique « chimie physique et chimie minérale » les catégories suivantes : « structure des atomes, radioactivité », « propriétés des atomes – poids atomiques », « constantes physiques », « cinétique des équilibres, thermochimie », « photochimie, photographie », « solutions, mélanges liquides », « métaux, alliages, solutions solides », « propriétés des surfaces, adsorption, colloïdes », « structure et propriétés des molécules », « électrochimie », « physique cristalline », « géochimie » [BSCF, 1944].

⁵² Pour l'année 1944, je décompte 4 articles en lien avec les solides pour la *Chaudronnerie* ; 3 pour les familles Lebeau et Trombe ; 1 pour la *Chrétienté*. On retrouve aussi des métallurgistes : Chevenard (3), des cristallographes : Jean-Jacques Trillat (1) et Wyart (1) [BSCF, 1944]. En 1946, les membres résidents du Conseil de la SCF sont Chrétien, Frèrejacque, Laffitte, Pierre Poulenc, Trombe, Wyart et les non résidents Andrieux, Lichtenberger, Michel, Rollet, Taboury [BSCF, 1946, procès-verbal du 11-1-46]. Hackspill est élu président de la SCF le 11 janvier 1946, Portevin en 1950, Chaudron en 1953.

échange. Deux à quatre fois par an, des réunions rassemblent les membres, d'abord pour exposer les bilans administratifs, mais aussi pour discuter science entre tous types de chimistes. Par ordre d'importance, « communication », « exposé », « conférence » sont autant d'occasions d'échanges. À une époque où les publications ne sont pas facilement accessibles ni reproductibles (VI.2.2), les échanges oraux sont extrêmement recherchés. Les disciplines, les familles, les laboratoires ont là, enfin, la possibilité de se mélanger. Les jeunes générations ont accès à la tribune même si peu de thésards présentent leur travail oralement et qu'en cas de co-signature, c'est le plus ancien qui communique. Des scientifiques étrangers sont invités pour présenter leurs travaux et leurs interventions orales sont intégralement reproduites dans le *Bulletin*.

De manière générale, la Société chimique de France et les chimistes français expriment des préoccupations industrielles. Des sociétés chimiques sont créées à cheval sur les espaces universitaire et industriel. Ainsi l'année 1951-52 marque l'avènement d'une nouvelle société chimique, multidisciplinaire, à vocation appliquée : le « Comité National de la Chimie » (CNC) sous la direction de Pierre Jolibois. Ce comité rassemblant une soixantaine de membres (dont un tiers de l'industrie) sous les auspices de l'Académie des sciences se donne pour but de décloisonner les mondes institutionnels et de favoriser les relations entre sociétés savantes (chimie, chimie industrielle, chimie physique, chimie biologique), entre pouvoirs publics, industriels et scientifiques, entre la France et l'étranger. Sa « méthode de travail est similaire à celle que M. le P^r Lebeau a appliqué à la Commission des Hautes Températures du CNRS ». ⁵³ Le CNC est découpé en quatre « commissions techniques » qui vise à « dégager quelques grands problèmes d'actualité chimique ». Celle de chimie minérale, dirigée par Chaudron, ne présente pas de sous-commission de chimie du solide [BSCF, 1952]. Le CNC se donne aussi pour mission de représenter la France à l'étranger. Ainsi la France se charge-t-elle des comptes rendus du douzième congrès de l'Union internationale de chimie (UIC) où on retrouve des rapports sur la « chimie minérale » (Bénard), la « métallurgie » (Chaudron) et les « recherches solaires » (Trombe).

Si l'on se focalise uniquement sur les solides, l'intérêt industriel est encore palpable avec la question récurrente des catalyseurs, que ce soit au CNC ou à la SCF. ⁵⁴ Cependant, quand on feuillette le *Bulletin* de la fin des années quarante en se concentrant sur les solides minéraux, la première impression qui se dégage est le foisonnement de thèmes différents (III.2.1). La seconde impression : l'existence à la fin des années 1940 de deux sujets à la mode : les « réactions dans l'état solide » (II.4) et la chimie des hautes températures (II.3). Couplés l'un à l'autre par la thermodynamique – puisque les hautes températures augmentent la réactivité des solides, généralement faible à température ambiante –, les deux sujets sont aussi socialement fréquentés par les mêmes chimistes. *Chaudronnerie*, familles Trombe et Lebeau y sont les plus actives. Ils ne sont pas les seuls en France. D'autres chimistes se placent aussi à l'interface entre réactivité et haute température sans pour autant être invités au colloque de 1948, à Paris ou associés à la Commission des hautes températures du CNRS. Ainsi, Henri Guérin, qui dirige la rubrique « chimie physique et chimie minérale » du *Bulletin*, incarne l'exemple surprenant d'un minéraliste à l'intersection des hautes températures et de la réactivité des solides, intéressé par les problèmes industriels, en relation avec Lebeau et qui, pourtant, n'est ni membre de la Commission, ni participant au colloque de

⁵³ La référence à la Commission CNRS dirigée par Lebeau est très commode. Elle peut s'apparenter à un hommage consanguin de fin de carrière (Jolibois est un ancien élève de Lebeau) mais aussi à un procédé de diversion – motivé par des raisons nationalistes ? –. En effet, la CNC française représente probablement une tentative inspirée par la chimie allemande, supposée plus performante en matière de décloisonnement, puisque l'Allemagne est dotée d'un Comité national de la chimie, dont Wilhelm Klemm est directeur en 1953 [BSCF, 1955].

⁵⁴ Cet intérêt est partagé par la SCF puisque le 11 juin 1952, Bénard fait un exposé sur la « Constitution des oxydes métalliques et activité catalytique » [BSCF, 1952].

Paris.⁵⁵ Si la chimie des hautes températures sera traitée ultérieurement (V.1), il est temps maintenant d'entrer dans le vif du sujet des « réactions dans l'état solide ».

III.4.1.2. Réactions dans l'état solide et actualité de la relation structure-propriétés

En 1948, au sein de l'espace européen, l'appellation « réactions dans l'état solide » rassemble des spécialistes d'électrochimie, de catalyse hétérogène, d'oxydation des métaux, de transformations du graphite ou des réactions de décomposition des oxydes (II.4). Sans structures institutionnelles fortes, le groupe s'apparente plus à un réseau qu'à une communauté même s'il partage une certaine unité de méthodes, de croyances, d'objectifs. Le colloque de Paris met en évidence cet œcuménisme cognitif souple autour des questions suivantes : structure atomique, facteurs géométriques, phénomènes dynamiques (diffusion, oscillation thermique), propriétés physiques, intérêt pour les applications (catalyse), et dans une moindre mesure, modèles théoriques. À ces idées clés sont associées les techniques qui les rendent possibles : diffraction des rayons X, marquage radioactif, mesures électriques, magnétiques. Il faut rendre visibles – quantitatives même – les relations entre la structure et les propriétés physiques des solides. Cette relation structure-propriétés n'est pas réservée à l'élite européenne des réactions dans l'état solide (incarnée par la *Chaudronnerie*). Elle est courante en physique et métallurgie (I.3.2) mais elle parvient aussi aux oreilles de la communauté française par d'autres voix.

Ainsi, la « chimie structurale » traverse la Manche pour sonner à la porte de la SCF. Une notice du *Bulletin*, consacrée à l'ouvrage anglais *Structural Inorganic Chemistry* [Wells, 1945], insiste sur la nouveauté et l'actualité de la « chimie structurale » [BSCF, 1946]. Cet intérêt résulte d'une évolution instrumentale en chimie – détermination des structures cristallines par diffraction des rayons X et des électrons –, et permet de relier la structure atomique ou moléculaire des composés solides à leurs propriétés. Un tel ouvrage détaillant les techniques et des cas concrets associés aux « théories les plus récentes » n'a alors pas d'équivalent en France « dans le domaine des corps inorganiques » (d'après l'auteur de la notice, qui n'est pas précisé).⁵⁶ La chimie structurale apparaît comme l'extension aux solides

⁵⁵ En 1945, maître de conférences à Nancy, Guérin publie *Le problème de la réactivité des combustibles solides* [Guérin, 1945] dont la « question si complexe » lui a été confiée par la « Commission du Centre d'études thermiques ». La préface est signée par Lebeau. Divisé en deux parties, l'ouvrage traite des « méthodes de déterminations des réactivités » puis des « facteurs dont dépend plus spécialement la carboxyréactivité : porosité, perméabilité, état de surface, résistance physique, conductibilité, teneur en matière volatile et en cendres, proportions relatives des variétés de C et facteurs expérimentaux (T, débit gazeux, ...) » [BSFC, 1945, p. 100]. Malgré l'expertise reconnue de Guérin et sa connaissance de Lebeau, il ne participe pas à l'ouvrage collectif [Lebeau, 1950], ni au colloque sur les réactions dans l'état solide [CNRS, 1949d]. En 1956, il est devenu professeur au laboratoire de « chimie industrielle » de Nancy où il s'est spécialisé dans les sels d'arséniates, d'arsénites et de phosphates. Lors de l'extension de la Sorbonne à Orsay, il quitte Nancy et part diriger à Orsay un « Laboratoire de chimie minérale » (1961) (annexe A.III.1). Un tel cas qui n'est sans doute pas une exception confirme la relativité de la représentativité de la Commission du CNRS en tant que communauté nationale de chimie des hautes températures (II.3).

⁵⁶ « Le développement des études cristallographiques à l'aide de la diffraction des rayons X et de la diffraction électronique a permis d'ouvrir un nouveau chapitre de la chimie : la chimie structurale et de relier les propriétés des corps à la configuration spatiale des molécules ou des ions constitutifs et à leur arrangement, en particulier à l'état solide [...] pas d'équivalent français [...] de la] chimie structurale dans le domaine des corps inorganiques. » On trouve des composés oxygénés, halogénés, sulfurés... associé aux « théories les plus récentes » [BSCF, 1946].

minéraux d'une idée courante pour la molécule en chimie organique.⁵⁷ La relation structure-propriétés atteint aussi les chimistes à travers les cristallographes. En mars 1948, le *Bulletin* présente le premier numéro d'une nouvelle revue internationale, *Acta crystallographica*, dont Wyart est « rédacteur régional » pour la France. Éditée par l'Union internationale de cristallographie (dont c'est la première réalisation), « son but est de publier les mémoires qui concernent la cristallographie dans son sens le plus large, c'est-à-dire *l'étude des propriétés physiques et chimiques de la matière intimement liées à son arrangement atomique* [c'est moi qui souligne]. » Elle « intéresse ainsi le chimiste comme le physicien, le métallurgiste et le minéralogiste comme le biologiste » [BSCF, 1948]. Ces deux exemples, empruntés à l'*Inorganic Chemistry* anglaise et à la cristallographie, popularisent parmi les chimistes français la croyance en une relation entre la structure et les propriétés d'un corps solide.

On peut objecter que ces deux exemples, ponctuels et étrangers, ne sont ni écoutés par un public de la Société qui serait hermétique aux influences extérieures, ni représentatifs du travail effectué dans les laboratoires de l'hexagone. L'examen d'un échantillon d'articles⁵⁸ du *Bulletin* écrits par des minéralistes relativise les témoignages visant à discréditer la chimie d'alors comme « vieillotte ». À nouveau, il suggère plutôt une pluralité de pratiques allant de la synthèse chimique à des caractérisations physiques et structurales multiples. Aucune publication ne donne l'impression d'appliquer une méthode systématique. Certains laboratoires utilisant la diffraction des rayons X sont convaincus de la pertinence de la relation structure-propriétés, qui façonne en partie leurs travaux (*Chaudronnerie*, Trombe, Brasseur). D'autres n'y croient pas, d'autres encore considèrent que le lien est moins important qu'un savoir-faire spécifiquement chimique (Montignie, Chrétien). La thèse selon laquelle la chimie du solide aurait réalisé le lien structure-propriétés pour les composés solides minéraux au cours des années 1960 est donc à nuancer. Avant 1950, l'idée que cette relation serait pertinente circule parmi les chimistes français puisque le *Bulletin* est facilement accessible et largement diffusé. Est-ce à dire qu'elle est massivement acceptée ? Probablement pas, mais certains considèrent la relation structure-propriétés comme acquise avant que ne soit prononcée l'expression « chimie du solide ».⁵⁹

III.4.1.3. Le retour des « berthollides » : un avant-goût de chimie du solide

Aux préoccupations méthodologiques des réactions dans l'état solide s'ajoute un intérêt pour les phases à « composition variable » [CNRS, 1949d]. La chimie d'après-guerre remet à l'honneur un thème de recherche un peu délaissé. Les composés à proportions variables que Louis Berthollet défendit au début du dix-neuvième siècle contre les « proportions définies » de Joseph Proust, ont été éclipsés au XIX^e siècle surtout avec les

⁵⁷ L'ouvrage de Linus Pauling : *Chimie générale. Introduction à la chimie descriptive et à la chimie théorique moderne* (1947), référence de la chimie anglo-saxonne, définit la « *structural chemistry* » comme l'« étude de la structure moléculaire en relation avec les propriétés des corps » [Pauling, 1951].

⁵⁸ Les « réactions à l'état solide » sont étudiées soit par des moyens rudimentaires, changement de couleurs ou de poids des composés (E. Montignie à Tourcoing), soit par études nanométriques en cherchant un lien entre les facteurs réactionnels et la structure cristalline (Bénard, LCTC). La synthèse chimique prévaut mais les chimistes se soucient aussi de caractériser les produits obtenus : soit « à l'œil » (Montignie), soit par diffraction des rayons X de Debye-Scherrer sur poudres (*Chaudronnerie*, Brasseur), soit par mesures physiques : pondérale (Trombe, Montignie), thermomagnétique (Michel), spectroscopique (Trombe, Brasseur) [BSCF, 1945-1950].

⁵⁹ Au moins deux des quatre plus grosses « familles » de chimie minérale travaillent sur la relation structure-propriétés : *Chaudronnerie* et famille Trombe. Ce n'est pas nouveau : dès les années 1930, la thèse de Michel par exemple avait pour but d'« établir les relations qui existent entre la structure cristalline et les propriétés magnétiques des solutions solides » d'oxydes de fer [BSCF, 1956, procès-verbal du 24 février].

beaux jours de la chimie organique. Les phases à composition variable (que les Anglais surnomment « berthollides » par opposition avec les « daltonides », composés à proportions fixes ou multiples) furent oubliées, la possibilité de réactions non totales s'évanouit, la chimie « stœchiométrique » triomphait [Bensaude & Stengers, 1992, p. 99-100]. La situation change avec l'étude des alliages métalliques par les métallurgistes, et des silicates par les cristallographes. Dès les années 1930, les chimistes des réactions entre solides commencent à explorer deux nouvelles familles de « composés minéraux à composition variable » : « hydrures, borures, carbures et nitrures métalliques » de type métalloïde (fort caractère métallique) et « oxydes, sulfures, halogénures » métalliques de type « ionique » [Bénard, 1951, introduction].

Peu avant 1950, les phases solides à composition variable ou « non stœchiométriques » sont devenues une source d'enjeu majeur des chimistes européens. En 1947, l'un des chefs de file de l'école britannique, John Stuart Anderson, qui travaille alors pour l'*Atomic Energy Research Establishment* (AERE) à Harwell [Hyde, 1993, p. 2], publie une revue critique sur les composés ioniques non stœchiométriques. Anderson [1947] fait un état des lieux des principaux résultats expérimentaux qui affluent à l'époque. La *Chaudronnerie*, au cœur du réseau européen, est aussi au cœur du sujet. Depuis le début de sa carrière, Chaudron se passionne pour les oxydes de fer. Après Forestier, il a lancé la thèse de Bénard sur l'étude du protoxyde de fer (FeO) et de ses diagrammes de phase (II.4.1). En étudiant la réaction de décomposition du protoxyde en fer et ferrites, le jeune thésard met en évidence que le protoxyde de fer est un solide à composition variable de formule (FeO_{1-x}) [Bénard, 1939]. Le maître lui demande alors de transposer à cet oxyde la notion de « solution solide », communément utilisée en métallurgie [Chaudron, 1954, p. 7]. Bénard montre que le protoxyde de fer présente des propriétés comparables à celles des alliages métalliques : l'analogie fonctionne ! Les composés minéraux non stœchiométriques présentent des propriétés similaires aux solutions solides métalliques, mieux connues. Mais la non stœchiométrie est aussi vue comme le résultat d'une réaction partielle dans l'état solide. Cette représentation explique l'imbrication épistémologique des sujets de recherche : réaction et non stœchiométrie des solides.

Chaudron prend conscience de cette imbrication et commence à la défendre. En 1948, lorsqu'il rassemble à Paris la fine fleur de l'aristocratie européenne, il rappelle, lors du discours d'ouverture, la proximité des « réactions dans l'état solide » avec la « diffusion ionique » et les composés non stœchiométriques. Car, parmi les réactions entre solides, une large place est donnée à la diffusion des ions, qui explique « la formation [de] solution solide [...] et des] composés non stœchiométriques tels que FeO, FeS, ZnO, CdO, etc. ». Si ceux-ci sont devenus extrêmement importants, c'est essentiellement parce que leurs « propriétés physiques – conductibilité électrique, perméabilité magnétique – et chimiques – stabilité, activité catalytique – peuvent varier dans de grandes proportions pour de très faibles variations de la composition. On peut ainsi, grâce à de légères modifications apportées aux conditions de préparation, obtenir des corps doués de propriétés remarquables, d'où le grand intérêt industriel qui s'attache à ces études. » [Chaudron & Bénard, 1949]. La non stœchiométrie est importante parce qu'elle induit de nouvelles propriétés, qui peuvent conduire à des applications.

Dans ce discours prononcé en 1948 Chaudron ne serait-il pas en train de formuler explicitement et publiquement la double relation structure-propriétés, propriétés-applications ? Or cette double relation constitue l'essentiel du paradigme dont se réclament les *solidistes* français à la fin des années 1970 : synthétiser de nouveaux composés solides en modifiant leur structure et leur composition pour obtenir des propriétés physiques spécifiques et utiliser ces propriétés afin de réaliser des applications industrielles (III.2.2). La surprise est de taille : le paradigme de la chimie du solide semble déjà en place trente ans avant l'entrée à

l'Académie des premiers *solidistes* ! Est-ce à dire que la chimie du solide est déjà en place ? Que les *solidistes* n'ont rien fait pendant trente ans ? Non, certes, car la chimie du solide ne se réduit pas à un énoncé de principes. La messe n'est pas tout à fait dite avec ces quelques mots de l'apôtre de la *Chaudronnerie*. Chaudron n'applique cette double relation qu'aux composés « non stœchiométriques » et pas à l'ensemble des composés solides. Pour une large part, la phrase correspond à ce que croit Chaudron. Est-ce qu'elle correspond aussi à ce qu'il fait ? Ou n'est-ce que ce qu'il propose de faire ? S'il la prononce, n'est-ce pas aussi pour convaincre que la tâche est large encore à remplir ? Ailleurs, à la même époque, Bénard insiste sur les incertitudes, l'ampleur du travail à accomplir [Bénard, 1946 & 1951]. Ces quelques phrases de Chaudron, prononcées en public, rendent caduque, il me semble, toute prétention à une fondation révolutionnaire de la chimie du solide par deux héros après 1950 (III.1.1). Il y a un décalage entre ce que les témoins pensent avoir accompli et ce qu'ils ont effectivement réalisé.

La phrase prononcée par Chaudron à un congrès international n'est pas un cas isolé en *Chaudronnerie*. Lors d'une conférence devant la Société, le 23 juin 1950, Bénard [1951] pose la question des composés non stœchiométriques dans l'arène nationale. La conférence traite des « combinaisons ioniques à composition variable ». L'exposé, qui se veut didactique, présente un état des lieux centré sur les composés ioniques. Comme pour les réactions dans l'état solide, quatre ans auparavant [Bénard, 1946], Bénard souligne la densité de résultats expérimentaux mais aussi les incertitudes, les contradictions au sein de la communauté occidentale. Un sentiment de doute se dégage de cet exposé au demeurant clair.

Fouiller plus profondément le texte de Bénard est intéressant car il constitue une sonde historiographique pour déchiffrer son état d'esprit, à l'époque. Je commence par un commentaire linéaire. La première partie, introductive, annonce une focalisation sur les phases ioniques, qui, seules parmi les phases à composition variable, peuvent être qualifiées de non stœchiométriques au sens strict (les phases métalliques et métalloïdes constituent des solutions solides tandis que les silicates sont des solides substitués).⁶⁰ Bénard démarque les types de solide suivant la nature de la liaison chimique, dont la nature dépend de l'électronégativité* des éléments. La théorie des bandes n'est pas évoquée. Le deuxième chapitre liste les « principaux composés ioniques non stœchiométriques » : oxydes, sulfures, halogénures binaires ou ternaires. L'auteur évoque en particulier la revue d'Anderson [1947], les bronzes de tungstène, de formule MWO_3 , M étant Na ou K, étudiés par les Suédois Hägg et Magnéli, les travaux allemands sur les oxydes et fluorures (W. Klemm, Zintl, C. Wagner), les travaux français (*Chaudronnerie*, Jolibois et Boullé sur les oxydes d'uranium). La troisième partie passe en revue les moyens de déterminer « l'étendue des variations de composition » : « examen micrographique », « rayons X et propriétés magnétiques », « variations du paramètre cristallin », « variations de la conductibilité électrique », « modifications des propriétés magnétiques », « équilibres chimiques hétérogènes » (par la mesure de la pression d'oxygène par exemple). Ceci révèle une polarisation de la relation structure-propriétés dans le sens structure←propriété. La propriété physique donne des informations sur la structure, la mesure physique est un moyen « d'identification » du solide.

⁶⁰ « Dire qu'une combinaison binaire AB solide est susceptible de présenter des écarts à la stœchiométrie, c'est affirmer qu'il est possible d'obtenir une série de préparations homogènes dans lesquelles le rapport (masse A)/(masse B) déterminé par l'analyse chimique peut représenter des valeurs différentes sans que le système cesse d'être constitué par une phase unique. » L'auteur précise cependant la relativité de la définition aux moyens d'investigation, il poursuit : « Or il est souvent difficile de prouver en toute rigueur qu'un système chimique est constitué par une seule phase et l'approximation avec laquelle on peut affirmer par ce procédé le caractère non stœchiométrique dépend en principe de la sensibilité des moyens dont dispose pour identifier les phases nouvelles qui doivent apparaître lorsqu'on s'écarte de la composition théorique (phases adjacentes). » [Bénard, 1951, p. 296].

La partie suivante cherche les « causes des écarts à la stœchiométrie », c'est-à-dire qu'il passe en revue les différents types de défauts microscopiques suivant les composés ioniques considérés en essayant d'énoncer des règles.⁶¹ Enfin, la cinquième partie détermine l'« influence des écarts à la stœchiométrie sur les propriétés physiques » en utilisant les travaux de théoriciens : « coloration » (J.H. De Boer, N. Mott), « conductibilité électrique » (C. Wagner, F. Seitz, W. Veith), « luminescence » (F. Seitz, N. Riehl). Cette fois-ci, la polarisation de la relation structure-propriétés est inversée dans l'autre sens : structure→propriété. La variation de structure induit une variation de propriétés. Bénard rajoute encore qu'une faible variation de composition peut induire une forte variation de certaines propriétés physiques, ce qui est caractéristique des composés ioniques (mais pas des solutions solides métalliques).⁶²

Le texte de Bénard [1951] contient plusieurs éléments importants, qui définissent sa pensée au début des années cinquante. Tout d'abord, l'importance de la bijection structure↔propriétés. Pour lui, la structure renvoie aux aspects géométriques (symétrie, maille) et chimiques (composition) tandis que les propriétés sont physiques (électrique, magnétique, optique, thermique). Cette terminologie précise la démarcation qu'il conçoit entre le territoire de la chimie et celui de la physique : sont chimiques, les cas pour lesquels l'analyse chimique directe a mis en évidence une phase non stœchiométrique (unicité de la phase avec une composition chimique non stœchiométrique) ; sont physiques, ceux pour lesquels ce sont les variations de propriétés physiques qui suggèrent une variation de composition sans que celle-ci n'ait pu être établie chimiquement [Bénard, 1951, p. 295, 302]. Ce n'est pas parce que Bénard précise cette distinction qu'il s'interdit de recourir aux travaux des physiciens, en particulier des théoriciens (cinquième partie), et de présenter leurs résultats devant des chimistes (à la SCF). S'il distingue des frontières techno-scientifiques entre physique et chimie, l'auteur les franchit allègrement. N'est-il pas alors un physico-chimiste de l'état solide ? Le recours aux résultats théoriques permet ainsi de relier qualitativement certaines évolutions expérimentales à des concepts théoriques.⁶³ Dernier point : il me semble que Bénard donne inconsciemment une définition de ce qu'il appelle la « chimie de l'état solide ». Étude physico-chimique des « composés minéraux solides », la chimie de l'état solide ne serait qu'un domaine inclus dans la chimie minérale.⁶⁴ La définition précise l'importance de la nature de la liaison chimique. Selon lui, la non stœchiométrie ne s'applique

⁶¹ La première des trois règles propose : « *Les écarts à la stœchiométrie se manifestent de préférence dans les composés qui contiennent un métal pouvant présenter plusieurs états de valence. Parmi ceux-ci figurent en premier lieu les éléments dits de transition (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni), dont les atomes possèdent des couches électroniques profondes incomplètes et des éléments comme le cuivre, le plomb.* » [Bénard, 1951, p. 300].

⁶² « Les variations de composition dans les combinaisons ioniques binaires, bien que portant en général sur un domaine assez restreint, entraînent très souvent des modifications importantes de certaines propriétés physiques. Ce caractère les différencie des combinaisons à liaison de type métallique dans lesquelles des variations mêmes importantes de la composition ne provoquent généralement que des modifications réduites de ces propriétés. » [Bénard, 1951, p. 302].

⁶³ « Il est possible de relier, au moins qualitativement, ces faits aux conclusions qui avaient été tirées de l'étude des mécanismes responsables de la variation de composition en généralisant une théorie proposée séparément par De Boer et Mott pour expliquer les variations de teinte des halogénures alcalins. » [Bénard, 1951, p. 302]. Cependant, la description de la liaison chimique reste classique (électronégativité) et n'utilise pas les théories quantiques (théorie des bandes en particulier).

⁶⁴ La définition n'est pas donnée explicitement. Bénard dit/écrit : « On doit remarquer que tous les exemples précédents se rapportent à des composés minéraux solides. Le problème des écarts à la loi des proportions définies est *donc* [mon italique] un problème de chimie de l'état solide, dans lequel les facteurs de nature spatiale sont appelés à jouer un rôle fondamental. » Le « donc » exprime à mon avis une évidence pour l'orateur (lien entre composés minéraux solides et chimie de l'état solide), qui est probablement accepté par les spectateurs de la conférence, donc un échantillon de la communauté française.

qu'aux solides minéraux parce qu'elle implique que la liaison soit polarisée (ou ionique).⁶⁵ Or, dans ces cas-là seulement, de faibles variations de compositions chimiques peuvent induire de grandes variations de propriétés physiques. Cette caractéristique des liaisons ioniques serait-elle l'une des causes de la popularité des solides minéraux durant la deuxième moitié du XX^e siècle ? Et par conséquent, l'une des causes du succès de la chimie du solide ? Une particularité épistémologique de la relation structure-propriétés aurait permis l'émergence sociale d'une communauté. Je laisse la question en suspens. Si Bénard se base sur l'élément chimique pour démarquer la chimie de l'état solide (ionique), il justifie son classement par des raisons physiques (grandes variations composition-propriétés). Il se présente ainsi une approche physico-chimique.

Avant 1950, sans que l'expression « chimie du solide » n'ait encore été formulée mot à mot dans aucun des comptes rendus institutionnels que j'ai consultés, les principales composantes de la « matrice disciplinaire » de la fin des années 1970 (III.2.2) circulent déjà parmi les chimistes non seulement dans le réseau européen (II.4.2) mais aussi dans l'espace national, à la Société chimique de France. Certains groupes de chercheurs – en France et à l'étranger – les appliquent même à l'étude de certains solides minéraux. En cela, Chaudron et Bénard peuvent être vus comme des précurseurs de la chimie du solide.⁶⁶ Chaudron lui-même ne revendique pas la paternité de la chimie du solide et continue toute sa vie de classer ses travaux en chimie minérale et en métallurgie. Ce serait raconter l'histoire à l'envers, sans se soucier de l'inertie du monde matériel. Une discipline universitaire ne coïncide pas avec un ensemble éparpillé d'objectifs épistémologiques et de pratiques quotidiennes, que l'historien s'amuserait à repérer dans quelque discours puis à ordonner sagement. Pour que l'ensemble de recettes devienne « matrice disciplinaire », il faut qu'il soit porté, reconnu et défendu par une « communauté scientifique » [Kuhn, 1970]. Il faut en somme qu'une communauté se soit formée, ait fixé ses repères méthodologiques et normé son activité. Or, vers 1950, rien de tel encore, la communauté n'existe même pas (II.1). En revanche, un réseau européen s'est développé, formé de quelques laboratoires occupés de chimie dans l'état solide.

III.4.1.4. Dynamisme européen, la « chimie de l'état solide » (1952-1956).

La première formulation de l'expression « chimie du solide » dans un texte officiel se produit en 1952 dans le *Bulletin de la Société chimique de France*. On la trouve dans une notice bibliographique [BSCF, 1952] présentant l'ouvrage du Suédois Hedvall, *Einführung in die Festkörperchemie* [Hedvall, 1952]. Selon la notice, l'ouvrage cible seulement la « réactivité du solide [...et] ne peut être considéré comme un "traité" de la chimie du solide ». Pour un chimiste français (anonyme), la réactivité du solide ne coïncide pas avec la chimie du solide. Pour un chimiste suédois, écrivant en allemand, la réactivité des solides constitue une introduction à la chimie du solide. Si le Français reconnaît une interrelation entre les deux, il tient cependant à les distinguer. Hedvall, comme en 1948 au colloque de Paris, est présenté comme « le fondateur [de la] Chimie des réactions entre solides », domaine dans lequel les « travaux expérimentaux [de son] Ecole de Göteborg constitue[nt] la base essentielle ». Une

⁶⁵ La liaison est ionique (ou polarisée) si les atomes voisins ont des électronégativités très différentes. Pour les oxydes ou les sulfures métalliques, c'est le cas parce que les éléments (O, S) sont électronégatifs tandis que les éléments métalliques sont électropositifs. Au contraire dans le cas d'un alliage, qui contient plusieurs atomes métalliques différents, les liaisons ne sont pas ioniques (ni polarisées) parce tous les éléments métalliques sont électropositifs.

⁶⁶ « C'est Chaudron qui a initié la chimie du solide tout en se passionnant pour les métaux purs. » [I Mondange, 2004, p. 4].

telle « mise au point, unique en son genre dans cette spécialité, était absolument nécessaire actuellement ». L'ouvrage souligne l'actualité de « la Chimie du solide [...] dans le domaine industriel [mais aussi] dans les Sciences chimiques ». Le double visage, scientifique et industriel, implique « la nécessité des liaisons entre laboratoire universitaire et l'Industrie ».⁶⁷

Cette « première » occurrence de la « chimie du solide », au détour d'une notice, si elle ne mettait en évidence l'incapacité de l'historien à trouver des sources plus précises, pointerait l'ironie de la quête des « origines » (III.1.2). Lorsque l'expression littérale apparaît à la surface de l'écriture institutionnelle, l'existence du « domaine » [BSCF, 1952] est évidente pour le rédacteur de la notice et son actualité ne cesse d'être rappelée. Deuxième ironie de l'histoire, le rédacteur de la notice lui-même est inconnu : Chaudron ? Bénard ? Troisième clin d'œil : l'expression n'est pas forgée en français mais traduite de manière non littérale de l'allemand : « *Festkörperchemie* » correspondrait plus à « chimie du corps solide » qui renvoie à la « chimie de l'état solide ». En 1952, à un moment où elle n'appartient pas encore à la taxinomie universitaire, la « chimie du solide » marque suffisamment de son empreinte l'esprit et les écrits de certains chimistes français (et européens) pour être qualifiée de « domaine ». Essentiellement expérimentale, elle mène des recherches fondamentales (réaction dans l'état solide) avec un souci des applications (solides pour l'industrie).

Les chimistes français s'inspirent du dynamisme européen en chimie de l'état solide. De nombreux échanges s'établissent entre chimie minérale et chimie physique. Du 2 au 7 juin 1952, Michel, Trombe et Foëx sont invités à communiquer au « Colloque international sur les Changements de phases » organisé à Paris par la Société de chimie physique. Ils participent à la huitième « séance de travail » (présidée par Néel) sur le « ferromagnétisme et points ; phénomènes électroniques » [BSCF, 1953]. À la SCF, les composés non stœchiométriques continuent d'être au cœur des discussions de l'état solide. Faivre donne une conférence sur « Les écarts à la loi des proportions définies » [Faivre, 1953].

Tout en s'ouvrant à la chimie physique, la Société chimique de France accueille aussi les influences étrangères. La présence britannique est forte. Anderson, désormais membre de la *Royal Society*, est invité le 12 mars 1953 à présenter un exposé d'actualité sur ses « Travaux récents sur la chimie des oxydes d'uranium » non stœchiométriques [BSCF, 1953, procès-verbal 12-3-53]. Pour Anderson, le choix de l'uranium est motivé par le poste qu'il occupe à l'*Atomic Energy Research Establishment* (nucléaire civil britannique). Pour les chimistes, Anderson est vu comme un théoricien de l'état solide étudiant les interactions entre défauts

⁶⁷ Ce livre s'adresse à trois « catégories de lecteurs » : « jeunes chercheurs, universitaires et ingénieurs [...] spécialistes qui souhaitent pouvoir rapidement « faire le point » des résultats acquis dans le domaine de la réactivité du solide à la date de parution de ce livre ; livre qui ne peut être considéré comme un "traité" de la chimie du solide. »

1) Introduction : « connaissances fondamentales (forces de liaison et structure) nécessaires à l'étude du solide »
2) « cinétique des réactions entre solides, et examine les phénomènes liés aux déplacements des atomes dans le réseau cristallin, en insistant particulièrement sur la méthode des indicateurs réactifs qui ont été utilisés sur une assez grande échelle dans son laboratoire. »

3) « étude proprement dite des réactions chimiques actuellement connues ; il s'étend principalement sur les très nombreux travaux qui sont sortis de l'Ecole de Göteborg, et analyse avec soin les facteurs essentiels qui déterminent la possibilité d'une réaction entre solides.

4) « importance de la Chimie du solide dans le domaine industriel, et sur les perspectives que l'on peut attendre du développement de cet important domaine dans les Sciences chimiques, il en profite pour insister sur la nécessité des liaisons entre laboratoire universitaire et l'Industrie.

Cette mise au point, unique en son genre dans cette spécialité, était absolument nécessaire actuellement, et sera lue avec d'autant plus de profit qu'elle est écrite par le fondateur de la Chimie des réactions entre solides, le P^r Hedvall, dont la somme des travaux expérimentaux constitue la base essentielle dans ce domaine. » [BSCF, 1952].

grâce à une approche thermodynamique statistique.⁶⁸ La non stœchiométrie participe d'ailleurs du mouvement plus vaste de l'étude des « défauts » dans les solides auquel contribuent physiciens des solides et cristallographes (I.3.2). Les chimistes français reprennent le sujet à leur compte. En octobre 1954, Raymond Rohmer, ancien élève de Chrétien, devenu professeur de chimie minérale à Rennes, présente une conférence sur « La chimie des défauts du réseau » à la SCF [Rohmer, 1955]. Dès le début de la conférence, il reconnaît sa dette envers l'ouvrage *Chemistry of the solid defect state*, écrit par A. Rees [1954], un autre théoricien anglais de l'état solide. Rohmer introduit le problème des « corps à composition variable » à travers les oxydes d'uranium (sans mentionner le travail d'Anderson) et souligne l'actualité du sujet depuis cinq ans. Rohmer se place dans la continuité des conférences de Bénard et Faivre. Pour la première fois, un membre de la *Chrétiété* parle des solides à la SFC et voilà qu'il reconnaît l'antériorité et les mérites de la *Chaudronnerie* pour la France. Rohmer insiste sur la démarcation entre défauts physiques (se référant à Rees) et défauts chimiques : en particulier les « solutions solides » qu'il emprunte à Bénard. Il présente les diagrammes de bandes simples (les trois archétypes : isolant, semi-conducteur, conducteur) tirés de la *Théorie moderne des solides* de Seitz [1949] et de *l'Introduction to solid state physics* de Charles Kittel [1953]. À propos de la méthode, il mentionne les « méthodes physiques utilisées pour étudier les défauts et pour construire les schémas énergétiques ». À Rennes, il dit collaborer avec un professeur de physique, Freymann, pour « la méthode par absorption hertzienne ». Tout au long de sa conférence, Rohmer milite pour que l'étude des défauts cristallins quitte le giron de la physique pour celui de la chimie : le « problème des défauts de réseau est avant tout un problème de Chimie, un problème de structure, d'analyses et de préparations chimiques. » Animé d'une même volonté de démarcation que Bénard [1951], sa conclusion exhorte les chimistes à (re)conquérir le territoire des défauts de l'état solide abandonné aux physiciens pour de (mauvaises) raisons instrumentales.⁶⁹

En mars 1955, lors de l'inauguration d'une nouvelle « section » de la SCF à Poitiers, physiciens et chimistes de l'état solide se rencontrent. Mott a été invité par les Français. Chaudron en tant que président sortant de la Société (1953-54) est chargé de présenter le conférencier et choisit de souligner les contributions à « la chimie de l'état solide » du théoricien de Bristol : « solides ioniques », « oxydation des métaux », « dislocations et défauts des réseaux ». Mott, de son côté, oriente sa conférence sur les défauts dans les seuls métaux. Chaudron poursuit : « ces théories [dislocations et défauts des réseaux] doivent être familières à tous les chimistes modernes qui s'intéressent à l'état solide. » [BSCF, 1955, p. 907-908].⁷⁰ Le

⁶⁸ Bruce Hyde [1993] a écrit une biographie détaillée de J.S. Anderson, son ancien directeur de thèse, lors de son décès. La circonspection est de rigueur vu les circonstances et la filiation de Hyde. « *Coupling their ideas [“point defects” of Wagner and Schottky] with those of Fowler and Lacher on “defect interactions,” his 1946 [Proc. R. Soc. A, 1946, 185, p. 69-89] paper was a general, statistical thermodynamic treatment of phase limits in binary, non stoichiometric compounds.* » [Hyde, 1993, p. 2].

⁶⁹ Pour l'étranger, Rohmer fait essentiellement référence à des théoriciens : Rees, Kittel, Mott et Gurney, Leverenz, Shockley, Seitz, Kubaschewski et Hopkins. Citant de mémoire, il prête cette phrase à Leverenz : « Les physiciens se lancent en ce moment dans l'étude des défauts de réseau ; or le problème des défauts de réseau est surtout un problème de Chimie. » En conclusion, il insiste à nouveau : « Les applications nombreuses dans le domaine de la physique pratique et les méthodes d'étude physiques que nous avons passées en revue ne doivent pas faire oublier, comme l'ont dit Rees et Leverenz, que le problème des défauts est un problème de Chimie, un problème de structure, d'analyses et de préparations chimiques. L'exemple de l'oxyde de zinc est typique. Seulement, pour le moment, les chimistes, ne soupçonnant pas encore les richesses de ce domaine de la recherche, l'ont abandonné aux physiciens, mieux équipés pour cette étude. » [Rohmer, 1955, p167].

⁷⁰ Cette revendication – la nécessité pour le chimiste de connaître la théorie des défauts étendus – n'est pas de pure forme. Cependant, il semble qu'elle intéresse davantage le physico-chimiste que le chimiste de l'état solide. Ainsi, deux ans plus tard, lorsque le *BSCF* [1957] présente l'ouvrage du physicien des solides, Jacques Friedel, *Les dislocations*, le compte-rendu, rédigé par Guy Emschwiller (membre du Laboratoire de Chimie Physique de

rapprochement entre physique des solides et chimie de l'état solide résulte d'une volonté des acteurs des deux domaines. Ainsi, la connaissance des théories physiques devient de plus en plus nécessaire aux chimistes. Lorsqu'en 1956 Bernard Claudel, du laboratoire Chrétien à la Sorbonne, fait une communication devant la SCF sur « Quelques aspects modernes de la conductibilité cristalline », la quasi-totalité ses références sont internationales et proviennent de la physique des semi-conducteurs et des défauts : Wilson, Seitz, Mott et Gurney, Wright, Shockley, Kittel, Rees... Le seul Français cité est Aigrain. Sur une centaine de citations, aucune ne fait référence à un chimiste français [BSCF, 1956], ce qui confirme le désintérêt des chimistes français pour les semi-conducteurs (II.1.2.1).

Le dynamisme européen se nourrit de rencontres internationales. En 1956, la chimie européenne accorde son crédit à la chimie de l'état solide. À Bruxelles, L'Institut de chimie Solvay place son dixième conseil sous le signe de « Quelques problèmes de chimie minérale » [Solvay, 1963]. Depuis 1922, les conseils Solvay rassemblent l'aristocratie de la chimie européenne : des réunions « élitistes [...] avec moins trente participants », européens pour la plupart. Entre-deux-guerres, le non renouvellement du comité scientifique favorise les « réseaux internes » et la représentation des mandarins. Pour la France, la représentation des Parisiens écrase celle des provinciaux [Charle, 1994, p. 391-393]. Les conseils Solvay ont pour but de traiter des questions d'actualité de la chimie. Après-guerre, ils deviennent plus spécifiques, centrés sur un thème brûlant : « isotopes » (1947, 7^e), « réactions d'oxydation » (1950, 8^e), « protéines » (1953, 9^e). Le dixième conseil Solvay a choisi de traiter simultanément trois questions de chimie minérale : « combinaisons non stœchiométriques », « réactivité des solides » et « sels complexes » [Solvay, 1956]. En chimie minérale, solides et solutions sont encore mélangés au cours des années cinquante. Ce n'est donc pas une consécration pour la chimie de l'état solide (qui aurait exclu les solutions), ce qui confirme que le domaine ne constitue pas une communauté de taille suffisante. En revanche, la présence de deux problèmes de la chimie de l'état solide souligne leur actualité. Les associer n'est pas anodin : on retrouve la même imbrication qu'au niveau national.

Par rapport au congrès de 1948, à Paris, des réorganisations thématiques ont eu lieu. Le solide en volume (réactions dans l'état solide et non stœchiométrie) est désormais dissociée des processus hétérogènes (catalyse et oxydation) qui ont fait l'objet du huitième conseil (« oxydation des métaux »). De même, les indicateurs radioactifs, qui avaient suscité des discussions au colloque de 1948, ont été renvoyés vers la chimie nucléaire, au septième conseil (« isotopes »). Certains solides spécifiques – que je qualifie d'« élémentaires » – sont étudiés séparément des autres. En septembre 1954, l'IUPAC vient d'organiser à Münster (Westphalie) un colloque de « chimie inorganique » autour de trois pôles : « Silicium. Soufre. Phosphates », dont l'initiative est due à Jolibois [BSCF, 1956]. En quelques années à peine (1948-56), la chimie de l'état solide se trouve réorganisée dans l'espace européen. Les phénomènes surfaciques hétérogènes se différencient de plus en plus des études volumiques des solides.⁷¹ Au sein de la chimie de l'état solide, les réactions en volume sont recentrées sur

l'ESPCI), insiste sur l'importance des dislocations pour « les propriétés plastiques des métaux, [...] la vitesse de croissance, [les] propriétés électriques des semi-conducteurs, [la] formation de l'image photographique, etc. » qui sont plutôt des propriétés qui intéressent les cristallographes, les physiciens ou les physico-chimistes mais assez peu les chimistes.

⁷¹ Cette réorganisation indique les grandes tendances mais elle n'est pas rigide non plus dans la mesure où des individus continuent à constituer des ponts entre les divers sous-domaines de la chimie de l'état solide. Bénard par exemple communique sur les réactions dans l'état solide (1946), les composés non stœchiométriques (1950), la catalyse (1952), parle de « physico-chimie de l'état solide » mais oriente principalement son laboratoire de « chimie appliquée » à l'ENSCP vers l'étude des surfaces oxydées [Teissier, 2007]. Deux autres chimistes français, Deschanvres et Michel, travaillent simultanément sur l'oxydation surfacique des métaux et les réactions volumiques [BSCF, 1956].

le phénomène incontournable de l'époque : la non stœchiométrie, qui s'inscrit dans la problématique des défauts. La non stœchiométrie place sur le devant de la scène les composés à liaison ionique, seuls corps non stœchiométriques au sens strict, dont les variations de composition entraînent des variations importantes de propriétés physiques (III.4.1.3).

Pour donner un visage plus concret à la chimie de l'état solide, il est intéressant de voir qui participe au dixième conseil Solvay. Si l'on écarte le comité belge d'organisation, vingt-trois scientifiques y jouent un rôle soit comme permanents du comité scientifique (4), soit comme « rapporteurs » (11), soit comme « invités » (8). Pour la France, Chaudron est invité et trois de ses anciens élèves (Forestier, Bénard, Collongues) sont rapporteurs. La *Chaudronnerie* est la seule famille française représentée, massivement de surcroît puisqu'elle présente un tiers des communications sur l'état solide et un quart du total du conseil. Sa forte participation place l'école française au cœur du processus européen de chimie de l'état solide. L'école suédoise ne comporte que trois membres : Hedvall – qui présente en français ! –, Lindner (Göteborg) et Hägg (Uppsala). Les Britanniques sont venus à quatre aussi mais dans des domaines différents : Barrer pour la non stœchiométrie de composés minéraux, Powell pour les structures organiques, Nyholm et Orgel pour les complexes. Un seul Allemand a été invité, un industriel de BASF, W. Schlenk. Un seul Américain aussi : W. A. Weyl, de la division de « *Mineral Technology* » de *Pennsylvania State University* intervient sur les réactions dans l'état solide. Six personnages étaient déjà présents au colloque de 1948 : Barrer ; Chaudron, Bénard et Forestier ; Hedvall et Hägg. Si les Anglais sont les plus éclectiques, les Français et les Suédois sont les plus nombreux sur les questions de l'état solide.

Lors du discours de clôture, le nouveau président du « conseil scientifique » A.R. Ubbelohde, professeur à l'*Imperial College* de Londres, résume les quelques jours de congrès. À partir de « l'étude des défauts de structure dans les corps solides et [...] de] la découverte des réactions chimiques à l'état solide », une « nouvelle branche de la chimie » s'est développée : « la chimie des corps solides ». Hedvall et Chaudron en sont deux « grands pionniers ». Grâce à l'emploi de « techniques nouvelles », les chimistes ont mis en évidence « surtout à des températures élevées, [les] migrations très considérables des éléments de structure dans les solides. » Cette chimie est stimulante pour les recherches « scientifiques » et d'une « grande importance industrielle ».⁷²

En résumé, la décennie d'après-guerre marque la mise en place progressive d'un réseau européen de « chimie de l'état solide » autour de quatre principaux pays : Royaume-Uni, Suède, France, Allemagne. En France, il s'incarne dans la *Chaudronnerie*. Parfois appelée « chimie du solide » ou « chimie des corps solides », cette nouvelle branche de la chimie se développe d'abord autour d'un foisonnement expérimental, induit par les « réactions dans l'état solide » et rendu possible par un recours aux hautes températures et aux

⁷² « Je dois [...] vous avertir que les corps solides ne sont plus du tout aussi inchangeants et aussi impénétrables que l'on pensait anciennement. Surtout à des températures élevées, il y a des migrations très considérables des éléments de structure dans les solides. En utilisant une grande variété de techniques nouvelles, la chimie a fait d'importants progrès dans l'étude des défauts de structure dans les corps solides et, dans la découverte des réactions chimiques à l'état solide. Ces développements de la chimie sont à la fois de haut intérêt scientifique, et de grande importance industrielle. C'est un plaisir de voir parmi les membres de ce Dixième Conseil de grands pionniers dans ces recherches tels que le Prof. Hedvall et le Prof. Chaudron. Mais tous les membres du Conseil qu'ils soient anciens ou nouveaux chercheurs dans cette nouvelle branche de chimie, ont profité des discussions germinatives qui ont eu lieu. Comme l'a dit une fois Sir Lawrence Bragg, il y a des discussions qui donnent une brûlante envie de retourner immédiatement au laboratoire pour mettre de nouvelles idées à l'épreuve. Je crois pouvoir assurer que nos débats donneront un nouvel essor aux recherches dans la chimie des corps solides. » [Solvay, 1956, discours de Ubbelohde].

instruments de mesure physique. Ses frontières sont fluctuantes mais on peut isoler deux tendances générales : malgré un nom générique, la « chimie de l'état solide » cible surtout les solides minéraux et les phénomènes volumiques homogènes. En effet, les années cinquante voient un renforcement des spécialisations, qui éloigne les phénomènes hétérogènes (catalyse, oxydation des métaux) de la chimie de l'état solide. Les solides métalliques ou covalents, s'ils restent importants, sont moins déterminants que les composés ioniques. Le graphite par exemple est tantôt étudié par les physico-chimiques (comme Adolphe Pacault à Bordeaux), tantôt étudié par les minéralistes (comme Albert Hérol à Mulhouse puis Nancy). Les chimistes français de l'état solide sont plus en plus convaincus : 1/ qu'un lien entre la structure cristalline et les propriétés physiques existe, permettant surtout au début un contrôle de la structure par la mesure physique ; 2/ de l'importance des « défauts » liés aux migrations ioniques, en particulier de la non stœchiométrie ; 3/ des potentialités énormes en termes d'applications industrielles. Ces convictions s'enracinent dans les pratiques de paillasse mais se développent au contact des disciplines connexes (cristallographie, métallurgie ou physique des solides), de l'industrie (en particulier le nucléaire), et enfin l'étranger (l'influence britannique semble particulièrement importante). Elles ne sont pas unanimement partagées, loin s'en faut. Les pratiques chimiques mises en oeuvre pour étudier les composés minéraux solides demeurent très variées. Le rapport à la physique est ambigu, entre méfiance et démarche pragmatique. Les contacts avec les physiciens restent ponctuels, individuels, lors des conférences par exemple. Certains chimistes ont lu les théories physiques appliquées au solide, qui les guident parfois, seulement pour des raisonnements qualitatifs. Si certains regrettent une spécialisation à outrance à l'intérieur de la chimie, la plupart des chimistes tiennent à démarquer clairement la chimie (synthèse et analyse chimiques, structure cristalline) de la physique (propriétés électriques, magnétiques, optiques). La défense du territoire constitue un leitmotiv. Le chimiste doit se réapproprier les instruments de mesure qu'il a longtemps laissés aux physiciens. Néanmoins, la « physicalisation » de la chimie de l'état solide semble plus tardive que pour d'autres sous-disciplines de la chimie comme les polymères ou l'organique [Morris, 2002 ; Reinhardt, 2006]. Serait-ce dû à une spécificité intrinsèque des solides par rapport aux molécules ?

À lire ce résumé, on pourrait croire que la « chimie du solide » existe déjà durant les années 1950. C'est que le regard rétrospectif est trompeur et crée une cohérence artificielle : j'ai voulu repérer et coordonner un maximum d'indices se rapportant à la chimie du solide. Dès que j'ai aperçu des mots évoquant la « matrice disciplinaire » des années 1970 (III.2.2), je les ai notés en voulant expliciter des liens, ce qui tend à déformer sans doute le message de l'auteur d'alors. Si j'ai employé diverses expressions pour désigner les acteurs des années 1950, c'est parce qu'eux-mêmes ne se nommaient pas ainsi et ne se reconnaissaient pas comme tels. On était avant tout chimiste, puis minéraliste ou organicien ou physico-chimiste, puis intéressé par les oxydes, les sulfures. La case contemporaine de « chimie du solide » ne correspond pas au quotidien ni aux représentations des acteurs des années 1950. Ce serait faire preuve d'anachronisme que d'assimiler « chimie du solide » et « chimie de l'état solide ». Celle-ci est antérieure, plus vaste et moins délimitée que celle-là. C'est pour cela que j'assimile la chimie de l'état solide des années cinquante à un réseau alors que la chimie du solide des années soixante-dix constitue une communauté. Il importe de souligner ces distinctions de vocabulaire. Chaque chimiste de la SCF ne vit pas l'enchaînement historique proposé ici, il voit beaucoup plus et beaucoup moins. Peut-être n'est-il pas aussi attentif que moi aux interventions de Hedvall, de Klemm ou d'Anderson ? Sa référence universitaire demeure la chimie minérale, la chimie de l'état solide n'étant qu'une « branche » de la chimie. La dynamique collective, que j'ai tenté de cerner pour la France, n'est pas institutionnalisée. Elle est portée par des individus en contacts personnels – une sorte de

confrérie européenne – et ne constitue pas un corps disciplinaire. Si, les membres de ces réseaux de connaissance utilisent le même vocabulaire (« chimie de l'état solide ») et la même rhétorique (une recherche scientifique et industrielle), ils ne partagent pas une définition unique et standard de la « chimie de l'état solide ». Il faut donc se méfier des mots, qui, à une époque donnée, recouvrent des comportements, des méthodes et des croyances différents. Les laboratoires pour une large part – et les chimistes eux-mêmes – poursuivent simultanément des travaux dans des cases que le regard d'aujourd'hui qualifie de disjointes. Pour eux, il y a une cohérence de leurs travaux. La quête des origines de la chimie du solide n'est donc pas assimilable à la seule traque des mots puisque les mots échappent à leur sens d'une époque à l'autre.

III.4.2. De l'état solide au solide minéral : vingt-cinq ans de spécialisation et d'institutionnalisation (1954-1979)

III.4.2.1. Originalité en synthèse et force motrice des hautes températures

Comme tout chimiste, celui de l'état solide se passionne pour de nouvelles synthèses. En 1955, Gérard Montel (CECM) prononce une mise au point sur des solides nouveaux : « les composés d'insertion » [BSCF, 1955]. Il dédicace son travail à son maître, Chaudron, qui l'a mis sur la voie (VI.1.1.1). Le 22 avril, un éminent professeur de Münster, Wilhelm Klemm,⁷³ est invité à présenter devant la SCF ses travaux originaux sur les « valences anormales dans les complexes du fluor et de l'oxygène » [BSCF, 1955, procès-verbal du 22 avril]. Son exposé, traduit en français l'année suivante dans le *Bulletin* [Klemm, 1956], reconnaît une dette envers les travaux de Scholder (Karlsruhe), qui « a préparé [vers 1925] sous forme de composés oxygénés, un grand nombre de combinaisons très stables présentant des valences anormales ». L'adjectif « anormal » se réfère aux degrés d'oxydation (normaux) des complexes en solution (chimie de coordination). Selon Klemm, « nous pensions trop par analogie avec ce qui se passe en solution aqueuse, où ces valences n'existent effectivement presque pas. » Ainsi, tout en esquissant une filiation entre la chimie de l'état solide et la chimie des complexes, qui constitue la référence, Klemm s'en écarte pour souligner la spécificité du solide. Son objectif est double : 1°) synthèse de composés aux degrés d'oxydation inusuels ; 2°) « comparer les propriétés de combinaisons présentant des édifices analogues, afin d'en tirer des résultats systématiques ». La synthèse est faite à haute température,⁷⁴ on suit minutieusement son

⁷³ Klemm est professeur, « Directeur de l'Institut de Chimie minérale à l'université de Münster, ancien président de la Société des Chimistes allemands et, depuis 1953, Président du Comité National de la Chimie en Allemagne. Les travaux [de Klemm] font autorité, qu'il s'agisse du domaine des éléments rares – gallium, indium, rhénium, germanium – de certaines combinaisons intermétalliques – en particulier des métaux alcalins – ou encore de l'étude de la conductibilité et autres propriétés à l'état fondu et de l'application des études magnétiques aux problèmes chimiques. [...] Membre du Comité de Direction de la Section Minérale de l'UICPA » [BSCF, 1955, p907]. La reconnaissance dont il dispose au sein de la communauté allemande après-guerre lui a aussi valu de diriger la *FIAT Review* pour la chimie inorganique [Klemm, 1948].

⁷⁴ Klemm précise un mode opératoire emprunté à Scholder (en remplaçant les alcalino-terreux par des alcalins) : « le principe de nos préparations est très simple : en faisant réagir avec précaution un courant d'oxygène sur du potassium métallique, nous avons préparé un oxyde dont la composition moyenne correspondait à $KO_{0,7}$. Bien entendu, il ne s'agissait pas d'un composé défini, mais d'un mélange de plusieurs corps que nous obtenions sous une forme finement pulvérisée. En l'absence d'air et d'oxygène, on mélangeait cet oxyde en proportions connues avec de l'oxyde de cuivre, par exemple ; le tout était mélangé intimement et avec un soin extrême dans un

déroulement en notant l'« aspect de la préparation » (four transparent) et les « variations de poids » (microbalance). Les composés solides sont ensuite caractérisés chimiquement (on note le « dégagement d'oxygène produit par les préparations lors de leur attaque par les acides appropriés »), structurellement (« diagramme de rayons X » pour déterminer les paramètres cristallins) et physiquement (mesure du « moment magnétique »). La comparaison d'un moment magnétique mesuré et d'un moment calculé à partir des spins permet de distinguer deux types de complexes : « normaux » (magnétisme de l'atome central uniquement) et « d'interpénétration » (différent par formation d'une liaison chimique) suivant qu'une liaison s'est formée ou pas. Le complexe en solution sert là encore de modèle au solide. L'ensemble des caractérisations permet d'obtenir des indices sur le degré d'oxydation de chaque élément, le recouplement des données étant censé faire basculer de la croyance vers la certitude.⁷⁵ Une substitution systématique sur une période du type $(\text{K}\text{O}_x + \text{M}\text{O}_y)$ avec $\text{M} = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}$ ne permet pas de généraliser une évolution structurale ou un degré d'oxydation. Son étudiant Rudolf Hoppe travaille sur des fluorures. Klemm conclut en précisant que son travail se poursuit et qu'il voudrait parvenir à déduire des comportements généraux. Il résume le travail qui a été accompli depuis les années vingt en faisant l'inventaire des nouveaux degrés d'oxydation des éléments de transition obtenus dans des solides stabilisés. Cet inventaire est retranscrit en annexe A.III.2.

L'école allemande fait ici la démonstration de son savoir-faire et son originalité en synthèse minérale devant la communauté française. Les Français, de leur côté, cherchent aussi des voies originales. L'année suivante, en juin 1957, Françoise Gaume-Mahn (élève de Trombe) présente un exposé d'actualité sur de nouveaux « composés réfractaires des métaux des terres rares : borures, carbures, nitrures, sulfures » dans lequel elle cite les travaux de Klemm, Picon et Flahaut [BSCF, 1956, procès-verbal 22 juin]. Ces trois communications – Montel, Klemm, Gaume-Mahn – faites à la Société chimique de France donnent trois exemples de synthèse solide à haute température. L'ensemble de leurs travaux concerne, du plus ionique au plus métalloïde, des fluorures, oxydes, sulfures, nitrures, carbures, borures. Les hautes températures qui servaient à étudier la réactivité des solides permettent aussi la fabrication de composés nouveaux.

Leur proximité cognitive se traduit par des rapprochements institutionnels. En octobre 1956, le comité exécutif de l'IUPAC réoriente sa « Commission des hautes températures » (dépendante de la chimie minérale) de la « thermodynamique des combustions » (phénomènes gazeux) vers les « propriétés chimiques des substances aux températures élevées » [BSCF, 1956]. Le seizième congrès IUPAC se tient à Paris en 1957 et la section « chimie minérale » est organisée par Bénard. Pour éviter une « excessive dispersion [devant] l'abondance et surtout la diversité des travaux », la section choisit une option inédite : « grouper [...] les sujets traités autour d'un petit nombre de centres d'intérêt ». Parmi les quatre thèmes retenus, on trouve deux thèmes de chimie de l'état solide : « Composés solides des métaux de transition » et « Propriétés chimiques des corps aux températures élevées ». Un tel rapprochement a été dicté par « les avis judicieux » de Chaudron, Klemm et H. J. Emeleus⁷⁶ [IUPAC, 1957]. Au sein des institutions nationales (SCF, CNRS) et internationales (conseils Solvay, IUPAC), quelques mandarins cumulent les positions et orientent les décisions. Une

broyeur à boules sous vide, puis porté à différentes hautes températures dans un courant d'oxygène. » Il cite aussi des travaux similaires de Glemser sur $\text{CrO}_{2,6}$ [Klemm, 1956].

⁷⁵ Une retranscription des errements du chimiste peut donner à peu près ça : nous avons obtenu des échantillons $\text{KCoO}_{2,8}$ puis nous l'avons mis « sous haute pression dans un autoclave » pour obtenir KCoO_3 « ce qui nous a fait croire à la valence 5 du cobalt », en fait ce n'était pas ça mais un mélange de deux composés comme le montre la raie de diffraction X du CsO_2 [Klemm, 1956].

⁷⁶ Emeleus (Cambridge) est un intime de Anderson avec qui il a écrit puis réécrit un fameux traité de chimie minérale : *Modern Aspects of Inorganic Chemistry* (trois éditions : 1938, 1952, 1960).

telle concentration de pouvoir facilite la convergence de la chimie de l'état solide et de la chimie des hautes températures.

Les rapports de force évoluent au cours du temps. À partir de 1954, la *Chrétienté* cherche à obtenir voix au chapitre des questions de l'état solide à la Société chimique de France. Ce n'est pas par la synthèse à haute température, terrain solidement occupé par la *Chaudronnerie* et la famille Trombe, qu'elle y parvient mais par une stratégie détournée. Pour faire le point sur les défauts dans l'état solide, Rohmer [1955] doit emprunter une large part de son discours à un ouvrage britannique. Claudel [1956] et Alfred Deschavres [1956] se focalisent sur la chimie des semi-conducteurs, terrain quasiment vierge en France pour la chimie (II.1.2.1). Par conséquent, l'étranger leur offre là-aussi des références de choix, en particulier les ouvrages de physique.⁷⁷ Mais lors de ces conférences, ils ne se citent pas eux-mêmes, ce qui suggère qu'ils n'ont pas encore publié sur le sujet. Grâce à une stratégie de contournement des niches thématiques déjà occupées, en s'inspirant de la littérature étrangère, la *Chrétienté* fait une entrée dans la chimie de l'état solide. Cependant, elle n'y acquiert pas encore droit de cité au milieu des années cinquante.

Chaudron, Trombe et leurs élèves sont-ils donc seuls à occuper le terrain? Qu'est devenue la famille Lebeau? Picon n'apparaît pas à la SCF. Flahaut ne fera sa première communication orale devant la Société qu'en 1960, à l'occasion des « Journées de la chimie de Rennes » alors qu'il est déjà passé professeur. Il fait le point sur sa spécialité (IV.1) : les sulfures métalliques [Flahaut, 1960] et insiste sur la prolixité de résultats expérimentaux durant la décennie écoulée.⁷⁸ Entre 1950 et 1960, ses premiers élèves publient huit thèses sur les sulfures, séléniures et tellurures métalliques [Flahaut, 1976, p. 8]. Il est étonnant de ne pas le voir s'exprimer devant la Société sur un sujet prometteur alors que son laboratoire produit. C'est qu'il ne sent pas personnellement proche de cette société savante.⁷⁹ Il a fait le choix d'une autre tribune que la SCF : la Commission CNRS des hautes températures et des réfractaires (V.1). Flahaut puis ses élèves vont trouver là un moyen de s'exprimer dans la sphère des hautes températures, dans laquelle on retrouve encore les mêmes familles (*Chaudronnerie*, Trombe, Lebeau). Les mêmes acteurs animent donc la chimie de l'état solide et la chimie des hautes températures au cours des années cinquante.

III.4.2.2. À l'heure de la politique scientifique, quelle place pour l'état solide en chimie minérale (1954-1959) ?

Les années 1950 marquent la prise en main de la recherche scientifique française par les politiques. Le premier secrétariat d'État à la recherche scientifique est créé en 1954 sous le gouvernement Mendès France. Il est confié à un scientifique réputé qui a été directeur associé

⁷⁷ Ce recours systématique aux travaux des physiciens contredit les allégations de Chrétien sur son attachement sans borne à la chimie contre la physique (III.2.1) mais reflète une stratégie de développement social et cognitif : contourner la *Chaudronnerie* et commencer à produire par mimétisme vis-à-vis de l'étranger.

⁷⁸ L'être social ne peut échapper à son environnement local. Ainsi, Flahaut choisit une périodisation qui correspond à son propre vécu. Dans son discours, il insiste sur la « multiplication considérable des mémoires » sur les sulfures métalliques « depuis 10 ans ». Or, ceci correspond – à deux ans près – à la période au cours de laquelle il a commencé à publier (1948-1960). Ce faisant, il pense probablement à ses travaux en disant cela.

⁷⁹ « JF : Je n'ai jamais eu des relations tellement efficaces avec la SFC, nous allions au réunion bien sûr mais il n'en sortait pas grand chose. Peut-être était-ce parce que nous ne savions pas les prendre ? En tout cas nous n'avons jamais eu de contact intéressant avec la Société Française de Chimie. – JR : On allait aux réunions du mardi assister aux exposés qui étaient faits par des gens très compétents mais qui allaient à une telle allure et sabotaient l'exposition à tel point que l'on ne comprenait rien. Je n'ai pas tiré grand chose de la SFC. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 13].

du CNRS, Henri Longchambon. Mais c'est une période sans faste pour la recherche française : en 1955 seulement 0,7% du PNB est consacré à la R&D. En 1956, le « colloque de Caen » rassemble des « États généraux de la recherche ». Même s'il ne débouche sur rien de concret dans une IV^e République affaiblie, il lance un vaste débat sur les questions de politique nationale de la recherche scientifique [Piganiol, 2003].⁸⁰ De manière discrète, le troisième Plan d'équipement (1956-1961) commence à s'intéresser aux questions scientifiques.⁸¹

Lorsque de Gaulle revient au pouvoir en 1958, il entend mener une politique scientifique cohérente au service des intérêts de la nation et à des fins économiques et stratégiques. À partir de janvier 1959, Michel Debré dirige la manœuvre comme Premier ministre. S'appuyant sur le travail et les réflexions de la période précédente, le nouveau gouvernement dote le pouvoir politique de leviers décisionnels. En décembre 1958, il nomme un conseil scientifique, le « Comité consultatif de la recherche scientifique et technique », composé de douze scientifiques de haut niveau. Ces douze – rapidement connus sous le nom de « sages » – constituent un « groupe permanent, restreint, interdisciplinaire, capable de parler d'une seule voix au nom de la science ». Trombe est l'un des douze « sages ». Par la suite, les effectifs seront renouvelés tous les deux ans. Doté de compétences scientifiques variées, le Comité consultatif prend des décisions pour les crédits des « organismes de recherche » et les « actions concertées ». Celles-ci permettent de concentrer les efforts de recherche publique autour de projets ciblés, de thèmes particuliers qu'il s'agit de développer au nom des intérêts de la nation. Cette organisation s'étoffe rapidement pour donner la « Délégation générale à la recherche scientifique et technique » (DGRST). Prévues dans le budget de 1960, elle est déjà opératoire avant de devenir officielle. Fin 1959, elle reçoit des fonds propres – « Fonds de développement de la recherche scientifique » – pour mener les « actions concertées » et des réorganisations structurelles. « Les douze se consac[r]ent alors plus spécifiquement à la réorganisation des structures de la recherche fondamentale ». Un « Comité interministériel », placé sous l'autorité du Premier ministre, coordonne et dirige la politique scientifique de l'ensemble des ministères et de la DGRST [Prost, 1988].

Dès 1959, le premier délégué général de la DGRST, Pierre Piganiol, demande à la direction du CNRS la rédaction d'un « rapport de conjoncture » sur l'état des lieux et les perspectives de la recherche scientifique pour l'avenir. La direction du CNRS s'adresse alors aux présidents de sections du comité national afin de « préciser les besoins de chaque discipline et d'en envisager le développement souhaitable dans les années à venir ». Le résultat est censé refléter « l'avis des scientifiques composant les Sections du Comité National » [RC CNRS, 1959, p. 5].⁸² C'est l'occasion pour les scientifiques de définir le domaine dans lequel ils travaillent. Chaque rapport de section procède d'une triple préoccupation : descriptive puisque issu de consultations auprès des praticiens ; normative parce que rédigé par le comité national définissant la section ; prescriptive comme recommandations aux

⁸⁰ L'idée selon laquelle la IV^e République aurait été trop faible pour mener une politique scientifique est problématique. En effet, cette interprétation est trop conforme à l'histoire officielle écrite sous et par la V^e République et qui tend à discréditer le « régime parlementaire » pour des raisons idéologiques [Bellon, 2007]. Le mouvement s'amorce sous le gouvernement Mendès France, une proto-politique scientifique est proposée mais sa mise en pratique n'a pas lieu à cause du changement de république.

⁸¹ En 1957, le rapport d'activité du CNRS indique une modification du plan quinquennal (1956-1961) par la « création d'un centre d'Etudes Cristallographiques à Nancy, en substitution de l'extension prévue du CECM de Vitry. » [RA CNRS, 1957, p.19]. Est-ce à dire que la chimie métallurgique est en perte de vitesse par rapport aux solides minéraux ou faut-il y voir une volonté de délocaliser la science universitaire en dehors de la région parisienne ?

⁸² Après ce rapport terminé en 1959, établir la conjoncture scientifique du pays devient l'une des nouvelles missions du CNRS lors des changements de statuts en décembre 1959 (décret 59-1398) [Prost, 1990]. Ces rapports de conjoncture serviront aussi de base pour la rédaction des plans quinquennaux du Commissariat au plan.

décideurs politiques des évolutions souhaitées. Chaque section cherche aussi à se situer par rapport aux autres en rappelant points communs, oppositions et connexions avec les disciplines voisines. La section 12 du CNRS, « chimie minérale », entreprend une vaste consultation auprès des universitaires et des industriels français. Le résultat rendu public [RC CNRS, 1959, p127-136] fournit une image de la discipline, reflet (déformé) d'une communauté scientifique.⁸³

Trois parties structurent le rapport du comité national de la section 12 : un état des lieux de la chimie minérale, des mesures proposées pour une réorganisation sociale, des sujets à développer en priorité dans l'avenir. Dans la première partie, le comité national définit la chimie minérale comme un « domaine » actif en plein développement (à l'échelle occidentale), dont les « limites [...] reculent tous les jours » pour des raisons méthodologiques et à cause d'un territoire resté à moitié vierge puisque l'étude de la moitié des éléments est restée superficielle. Paradoxalement, la section 12 du CNRS se pose en victime sociale au niveau national par rapport à l'hégémonie de la chimie organique.⁸⁴ Il n'est pas juste, dit le rapport, que certaines sections disposent de plus que leur dû : alors qu'on trouve quatre sections chimie au CNRS, les effectifs de la section 12 représentent moins de 20% des totaux de la chimie, ce qui est inférieur au quart des effectifs de la chimie. Pour pallier le manque en chimie minérale, la section 12 émet « le vœu » d'accroître exceptionnellement le contingent de jeunes chercheurs, à « soixante [...] stagiaires de recherche » (sur trois ou six ans). Ce vœu restera pieux : le CNRS, sourd aux prières des *minéralistes*, accroît au contraire l'écart des effectifs entre chimie minérale et les trois autres sections au cours des années 1960 (III.3.2.3). Le ton revendicatif contraste avec des discours plus sereins des physico-chimistes et des organiciens.⁸⁵ Le rapport décrit la chimie minérale comme un espace dynamique, aux frontières floues mais aux méthodes propres, menacé d'oppression par des voisines, plus fortes. L'état des lieux évoque des « progrès » récents dans l'étude de certains éléments chimiques (en particulier des métaux et semi-conducteurs) sans préciser l'état physique des composés dont il est question. En insistant sur les liens de dépendance industrie et science, la section 12 fait état de trois industries de pointe : « nucléaire », « aéronautique »,

⁸³ L'image spéculaire est déformée par les enjeux de pouvoir au sein du comité national de la section. En 1959, celui-ci se répartit comme suit en plusieurs groupes d'influence (familiale et disciplinaire) : *Chaudronnerie* (Bénard, Chaudron, Michel et Chevenard), famille Trombe (Trombe, Loriers), *Chrétienté* (Chrétien, Tridot), famille Gallais (chimie des complexes : Gallais, Grat Cabanac) et des individus isolés : Andrieux (électrochimie), René Pâris (Société Pechiney), Mlle Stora (rayons X). De plus, les noms propres (des acteurs) ont été supprimés du rapport de conjoncture rendu public, ce qui regrettable pour le travail historique.

⁸⁴ « La commission désire souligner la situation paradoxale qui est actuellement celle de la chimie minérale en France. A l'heure même où cette discipline connaît un essor remarquable dans les pays à haut potentiel scientifique et technique, elle souffre en effet dans notre pays d'un certain discrédit [...] à ces perspectives bien modestes s'oppose dans leur esprit le tableau des progrès presque illimités que l'on peut attendre de la synthèse organique. Or, en fait, les limites du domaine de la chimie minérale reculent tous les jours, d'une part parce que des méthodes de travail originales et des moyens expérimentaux plus puissants ouvrent des voies nouvelles pour l'étude d'éléments dont la chimie paraissait fixée – comme le bore, le soufre ou le phosphore par exemple – et d'autre part parce que l'étude de près de la moitié des éléments naturels n'avait été effectuée en réalité que d'une manière très superficielle. » [p. 127] puis « Il n'est peut-être pas superflu non plus de souligner que les progrès de la chimie organique elle-même sont, dans une certaine mesure, subordonnés à ceux de la chimie minérale qui lui fournit en particulier, les matériaux permettant de renouveler les techniques en s'écartant résolument des conditions habituelles de température et de pression, et les catalyseurs qu'elle élabore et qu'elle étudie selon ses méthodes propres. » [RC CNRS, 1959, p. 129].

⁸⁵ Les sections 11, « chimie physique », et 13, « chimie organique », ne mentionnent ni les autres disciplines, ni une quelconque rivalité entre elles. En revanche, la chimie organique se définit comme « la branche de la Chimie dont les développements sont les plus spectaculaires quant à leur incidence sur notre vie quotidienne. » [RC CNRS, 1959, p. 137-143].

« électrique », et d'une industrie traditionnelle toujours importante (la « grande industrie minérale »).

La deuxième partie du rapport se concentre sur les « mesures propres à accroître l'efficacité de la recherche en chimie minérale ». Confrontée à une double nécessité en chimie minérale : augmentation des dépenses instrumentales (synthèse et caractérisation) et croisement indispensable des techniques de caractérisation, le comité national suggère une coordination des moyens matériels et des sujets de recherche.⁸⁶ Ces réorganisations concernent en priorité les petites équipes et non les « laboratoires universitaires importants » ni les laboratoires rattachés au CNRS. Cependant, le choix de regroupements éventuels entre petites équipes doit être laissé au soin des « chefs de laboratoire ».

Enfin, la troisième partie énumère les sujets « devant faire l'objet d'un effort particulier » en distinguant les « sujets principaux » (large consensus) et les « autres sujets [...] signalés moins fréquemment », et au sein de chaque partie, entre propositions universitaires et industrielles, qui « révèle[nt] de profondes analogies ». Parmi les sujets principaux universitaires, les deux premiers « secteurs » cités sont la « Chimie de l'état solide » et la « Chimie des hautes températures ».⁸⁷ La chimie de l'état solide est censée regrouper les phénomènes de surface (oxydation, réduction, catalyse) et les phénomènes volumiques : « Réactions entre solides (frittage, préparation de réfractaires, ferrites, semi-conducteurs) » et « Oxydes et sulfures non stoechiométriques ». Les hautes températures s'intéressent aux « Techniques de production des températures élevées », aux « Matériaux réfractaires » et aux « Réactions ». Malgré un recouvrement partiel, les deux secteurs sont explicitement séparés. D'autres secteurs contiennent des chimies des éléments qui peuvent aussi être assimilées à de la chimie de l'état solide : terres rares, « réfractaires (borures, siliciures, etc.) », dans les sujets secondaires : « halogénures », chalcogénure (sulfure, tellure, sélénure). L'établissement de diagrammes de phase et la croissance des cristaux sont deux sujets secondaires. À nouveau, vers la fin des années 1950, l'état solide – même s'il est largement représenté dans le rapport de la section 12 – ne constitue pas un ensemble cohérent mais fragmenté sous plusieurs appellations. La division « élémentaire » en particulier reste très développée. Pour leur part, chimie de l'état solide et chimie des hautes températures sont reliées l'une à l'autre. L'image fragmentée est encore plus sensible dans le classement industriel qui énumère des sujets sans cohérence globale.⁸⁸

III.4.2.3. Balbutiements d'une « communauté » entre outsiders et potentats (1960-1966)

⁸⁶ « L'examen des sujets de recherche qui sont actuellement étudiés ou que souhaitent voir aborder dès que possible les minéralistes, fait apparaître deux conditions indispensables à la réalisation de travaux de qualité :

1° Mise en œuvre d'appareils onéreux pour l'élaboration des corps à étudier (hautes et basses températures, hautes et basses pression, en particulier) et pour leur examen (spectrographie moléculaire, rayons X, microscopie et diffraction électroniques, résonance magnétique, en particulier).

2° Nécessité de conjuguer l'emploi de plusieurs techniques en vue de résoudre un problème déterminé. » [RC CNRS, 1959, p. 130].

⁸⁷ Les 7 « secteurs » sont dans l'ordre : « Chimie de l'état solide », « Chimie des hautes températures », « Préparation et étude d'éléments de haute pureté », « Etude des éléments rares ou d'utilisation récente », « Chimie du bore, du fluor, du silicium, du phosphore », « Problèmes de l'énergie atomique », « Réactions sur sels fondus, électrolyse ignée » [RC CNRS, 1959, p. 134-135].

⁸⁸ Pour l'industrie, les composés minéraux solides – à l'exclusion des métaux – sont présents dans 7 des 10 propositions principales. Les composés des terres rares et du soufre sont mentionnés dans les sujets secondaires [RC CNRS, 1959, p. 135].

Le début des années soixante est marqué par une offensive des *outsiders* de la chimie de l'état solide. La *Chrétiété* se montre particulièrement souvent à la tribune de la SCF. Pour la seule année 1960, le Laboratoire Chrétien présente trois contributions originales sur des oxydes de vanadium et de rhénium : Deschanvres, William Freundlich et Jacques Déduit. Rohmer, nommé à l'Institut de chimie de Strasbourg en 1957, fait une communication « sur les niobates de potassium ». Les premiers étudiants d'Hagenmuller – Jean Rouxel et Antoine Hardy – font leur apparition respectivement sur des solides à base de soufre et sur la réactivité du permanganate de potassium.⁸⁹ Michel Figlarz, du « Laboratoire de chimie des solides » (Jean Besson, Sorbonne), expose son travail sur les poudres de cobalt.⁹⁰ À partir de 1961, la Société chimique de France procède de manière informelle à une spécialisation des séances. Autrefois éclectique, chaque séance regroupe désormais deux ou trois communications autour d'un thème unique. La chimie de l'état solide fait partie des thèmes même si l'expression n'est pas littéralement usitée.⁹¹ Les séances du 22 décembre 1961, des 12 janvier et 23 février 1962 opèrent *de facto* ce regroupement autour des problèmes de chimie de l'état solide [BSCF, 1962].

Les *outsiders* commencent à se faire entendre aux séances scientifiques et locales de la Société. Pour les discours officiels cependant, la *Chaudronnerie* garde la main. Ainsi, lorsque le 13 décembre 1962, la Maison de la chimie rassemble la communauté française des chimistes « Sur les tendances actuelles des sciences chimiques », c'est Bénard (nouveau mandarin) qui s'exprime pour la chimie minérale.⁹² Il souligne le passage d'une chimie minérale descriptive à une chimie comparative s'efforçant d'interpréter (comme en chimie physique) voire même de prévoir. Parmi les sept domaines aux développements « les plus spectaculaires », il cite la « chimie de l'état solide », que se serait « annexée » la chimie minérale depuis quelques dizaines d'années. Bénard veut convaincre son auditoire de l'importance de la synthèse chimique, qui serait le point fort du *minéraliste*, parce que la synthèse permet de fabriquer quasiment à la demande des solides aux propriétés intéressantes (physiques et catalytiques) en jouant sur les éléments constitutifs et les défauts. Ces propriétés conduisent alors aux applications technologiques.⁹³ D'autre part, l'orateur tient à lier la

⁸⁹ Les trois contributions du laboratoire Chrétien sont : William Freundlich, « Réactions dans le système CaS-V₂O₅ » ; Jacques Déduit, « Etude du système VO₂-CaO » ; Alfred Deschanvres, sur les oxydes de rhénium. « Le thiochlorure et le thioamidure d'aluminium » pour Rouxel (1960) ; « Sur la décomposition thermique du permanganate de baryum : identification des phases, études cinétique et structurale » (1961) pour Hardy [BSCF, 1960-1961].

⁹⁰ La thèse que Figlarz présente en 1966 s'intitule : *Étude de poudres de cobalt : mécanisme de production et morphologie* [Figlarz, 1966].

⁹¹ Je n'ai vu aucune mention explicite de la spécialisation des séances de la SCF en 1961. Néanmoins, le regroupement a lieu *de facto* pour les séances citées [BSCF, 1962]. Cette spécialisation ne devient officielle que sous la présidence de Champetier à la « séance du conseil » du 22 janvier 1963 qui crée deux nouvelles « sections » : « chimie minérale et générale » et « chimie organique » qui s'ajoutent à celle de « chimie analytique » (qui existe depuis 1958). Pour justifier ce choix, Champetier dit qu'il « pense qu'il est difficile d'être aussi universel qu'il y a vingt ans » et propose pour chaque section une séance mensuelle [SCF, 1963, séance 22-1-1963]. On voit là que les pratiques usuelles dans une institution (1961) ont un temps d'avance sur les réformes institutionnelles (1963).

⁹² Il est significatif que le découpage traditionnel soit conservé à l'occasion de cette réunion : « chimie physique » (Maurice Letort), « chimie minérale » (Bénard), « chimie organique » (Henri Normant), « biochimie » (Edgar Lederer) [BSCF, 1963, p. 919-947].

⁹³ « La chimie minérale s'est annexée depuis quelques dizaines d'années un domaine très différent des précédents et entièrement nouveau : la chimie de l'état solide. Les progrès d'investigation des corps solides ont révélé en effet que ceux-ci présentaient des caractères spécifiques dont l'étude n'avait été abordée jusqu'alors que d'une manière empirique. Entre autres problèmes il y a celui que pose l'existence des composés ioniques non stœchiométriques. Bien que la détermination des causes de la variation de composition relève essentiellement de la physico-chimie, la préparation des phases non stœchiométrique constitue un problème de chimie minérale extrêmement intéressant et difficile. La préparation de certains catalyseurs, celle des oxydes semi-conducteurs ou des oxydes ferromagnétiques comme les ferrites, dont l'intérêt technique est considérable

chimie de l'état solide aux questions de métallurgie (synthèse et purification des métaux). C'est donc l'image d'un état solide continu qu'il propose : de la liaison ionique (minéraux) à la liaison métallique (métaux), de la surface au volume. Inspiré par Chaudron, Bénard décrit la chimie de l'état solide comme un continuum du métal à l'oxyde.

La *Chaudronnerie* est aussi impliquée dans d'autres projets au-delà de la communauté chimique française. Au cours de l'année universitaire 1961-1962 se tient au Centre d'études nucléaires (CEN) de Saclay un « séminaire de chimie des solides ». Dédié à la « Structure et topochimie des solides minéraux », il est publié par les soins du CEA [CEA, 1963]. Le séminaire est à l'intersection de plusieurs espaces sociaux : la recherche publique à vocation appliquée – le CEA et l'ONERA – et la recherche universitaire – la *Chaudronnerie* et la physique des solides –. C'est de l'organisme appliqué que provient l'initiative : le « service de chimie des solides »⁹⁴ du département de métallurgie du CEN Saclay et l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) financent et accueillent le projet. Raymond Caillat – chef du service de chimie des solides et professeur à l'INSTN – et A. Accary – chef de la section de métallurgie des combustibles réfractaires, maître de conférences à l'INSTN – forment la cheville ouvrière du séminaire. Celui-ci a été placé « sous le patronage » de Chaudron, alors membre de l'Institut et conseiller scientifique du CEA. Ses élèves y assurent cinq des sept conférences prononcées durant l'année : André Michel, Jacques Oudar (élève de Bénard), Michel Fayard, Robert Collongues, Christian Goux exposent sur la chimie et la métallurgie de l'état solide (surface et volume). Marcel Matthieu, qui a quitté le Laboratoire des services chimiques de l'État (II.4.2) pour l'ONERA, traite des « réactions topochimiques ». Enfin, Pierre Aigrain, seul physicien, fait un exposé simple sur la théorie des bandes et les liens entre les propriétés des solides et les diagrammes de bande. L'ensemble du séminaire a pour but de rassembler, autour de « sujets aux frontières de la chimie minérale, de la chimie physique et de la métallurgie », des chimistes, des métallurgistes et des physiciens pour permettre de « fructueuses transpositions d'idées et de méthodes ». Cette expérience d'un séminaire multidisciplinaire autour de la chimie de l'état solide constitue, me semble-t-il, une première au début des années 1960, dans le paysage français où chimie et physique de l'état solide demeurent généralement séparées pour les congrès.⁹⁵

n'ont pu être résolus à l'échelle industrielle que grâce aux études préalables sur les équilibres chimiques hétérogènes qui s'établissent entre ces phases et des atmosphères gazeuses de composition appropriée. Problème de chimie de l'état solide également que celui de la préparation de phases contenant des traces d'impuretés activatrices et dont les domaines d'application s'accroissent chaque jour dans les domaines les plus variés : catalyse, luminescence, photo-conductivité, thermo-électricité. [...] Le moment n'est pas loin où l'ingénieur pourra fournir des diamants "dopés" par des impuretés soigneusement choisies et dosés en vue d'obtenir des propriétés bien déterminées. Dans ces domaines le physicien constitue pour le minéraliste un client stimulant qui commence à se rendre compte de la qualité des services que celui-ci peut lui rendre. » [Bénard, 1963].

⁹⁴ Dans la quête institutionnelle de l'émergence de la chimie du solide, cette appellation « chimie des solides » constitue un élément intéressant. Forcée au sein d'un organisme d'état à vocation appliquée (CEA), elle se construit sur le mode pluriel sur le modèle initié par la « physique *des* solides » (qui s'oppose au singulier de la chimie de l'état solide). D'autre part, cette appellation est institutionnalisée assez tôt au CEN, au moins depuis 1958 (contrairement à la chimie de l'état solide qui reste longtemps d'un usage non institutionnel). En effet, Accary apparaît dans [CEA, 1959] comme membre du service de « chimie des solides ».

⁹⁵ Du 9 au 11 juillet 1962 par exemple, le Laboratoire de physique des solides d'Orsay (Guinier et Friedel) organise un colloque international sur des questions théoriques et expérimentales de « La structure des solutions solides métalliques ». « Ce Colloque a porté principalement sur la structure électronique des solutions métalliques et sur les progrès récents réalisés dans le domaine de la structure des impuretés, des couplages entre impuretés, des solutions solides concentrées. [...] Les phénomènes d'ordre atomique – ordre local, zones de Guinier-Preston, ordre à grande distance, antiphases périodiques – étaient également à l'ordre du jour. » [RA CNRS, 1962, p. 36]. Aucun chimiste n'a été invité à communiquer. Y participent-ils en tant qu'auditeurs ? Probablement pas puisque les organisateurs précisent : « nous avons pensé que le moment était opportun de faire

Dans les années qui suivent, trois colloques internationaux (un par an) vont être organisés par des chimistes français : Bertaut, Hagenmuller et Chaudron, sur les questions de structure cristalline : « La diffraction et la diffusion des neutrons » à Grenoble (1963), « Les composés oxygénés des éléments de transition à l'état solide » à Bordeaux (1964) et « Les propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux réfractaires à haute température » à Paris (1965). Ces colloques constituent d'abord une occasion de dialoguer avec les physiciens et les étrangers. Ces rencontres formelles répondent à des relations informelles dans lesquelles certains se distinguent.⁹⁶ Pourtant, les trois colloques ont des significations différentes. Alors que les thèmes des colloques sont proches, leurs impacts sont complètement différents sur la chimie française de l'état solide : le premier est marginal pour les chimistes (mais réunit cristallographes et physiciens) ; le second marque fortement les minéralistes de l'époque et les futurs solidistes (IV.4.1.2) ; le troisième est considéré comme une réunion sur les hautes températures et la métallurgie.⁹⁷ Même si ces trois colloques, organisés par des chimistes, débattent de questions de l'état solide en associant des chimistes à des physiciens, ils ne sont pas vécus de la même façon par les contemporains et leurs descendants. Les faibles différences épistémologiques renvoient à de fortes divergences communautaires : Bertaut, quoique chimiste, est marginalisé par la communauté des chimistes de l'état solide à cause de sa proximité avec les physiciens des solides et des questions structurelles auxquelles il s'intéresse ; Chaudron refusant de se voir attribué l'étiquette de chimiste de l'état solide – qu'il n'utilise d'ailleurs jamais – choisit de rester à la croisée des chemins entre chimie minérale et métallurgie ; Hagenmuller cherche une voie nouvelle à l'écart des représentations traditionnelles où il est minoritaire et se lance résolument dans la brèche de « l'état solide » minéral.

Structurants au niveau national, ces congrès se situent dans le mouvement international physico-chimie de l'état solide (III.3.1). Ils sont contemporains de la création des premières revues spécialisées à partir de 1963 (III.3.1.2) et de la croissance éditoriale de la deuxième moitié de la décennie 1960.

Cette activité autour de la chimie de l'état solide associant des individus, des laboratoires et des institutions scientifiques (SCF, CNRS) atteint bientôt la sphère politique. Pour la première fois en 1964, le rapport adressé au Commissariat général du plan mentionne l'importance de l'ensemble « métallurgie et chimie de l'état solide ». Le « 5^e plan de développement économique et social » (1966-1970) aura donc pour objectif – entre autres ! – de développer l'étude des propriétés physico-chimiques et mécaniques des composés solides, ce qui « correspond à l'un des grands besoins de la science et de l'industrie actuelles. » Il vise à améliorer les propriétés des solides afin de répondre aux besoins des industries, en

le point, en réunissant des physiciens qui étudiaient les mêmes alliages à des points de vue très variés » [CNRS, 1963].

⁹⁶ « Il faut bien dire que la barrière – si barrière il y a –, les frontières plutôt entre la chimie du solide et la physique du solide étaient très ténues à cette époque-là grâce à des personnalités comme Hagenmuller d'un côté, qui était me semble-t-il assez ouvert à la physique et de l'autre côté, ici Friedel très ouvert à la chimie du solide. Ça tenait plus à des personnalités – les contacts étaient des contacts personnels – qui engageaient ensuite leurs élèves. » [I Jérôme, 2006, p. 16].

⁹⁷ Seul le colloque de Bordeaux est publié au *Bulletin de la Société chimique de France*, intégralement avec la liste des participants [BSCF, 1965, p. 1043-1216]. D'autre part, il est considéré comme l'un des actes fondateurs de la chimie du solide par des héritiers de Hagenmuller. A l'époque toutefois, il se présente comme un congrès de « chimie minérale » [RA CNRS, 1964, p. 43]. Le colloque de Grenoble n'est mentionné au *Bulletin* que trois ans après sa tenue [BSCF, 1966], à propos de la publication que le CNRS en fait [CNRS, 1964]. Il est détaillé par le CNRS dans le [RA CNRS, 1963, p. 37] mais n'a été mentionné dans aucune interview de chimiste que j'ai consultée. Celui de Paris n'est pas mentionné au *Bulletin* mais dans le [RA CNRS, 1965, p. 56] comme une œuvre de la « Commission des hautes températures du CNRS ».

particulier nucléaire et spatiale. Les solides sont considérés comme des matériaux. Le rapport associe étroitement chimie et métallurgie, propriétés physico-chimiques et mécaniques, métaux et autres substances.⁹⁸ Même si la continuité épistémologique du métal au minéral est sous-entendue, dès qu'il s'agit de formuler les « thèmes de recherche prioritaires », le rapport distingue la « chimie des métaux réfractaires et des métaux purs » et celle « de l'état solide et des matériaux non métalliques ». Les métaux prioritaires : niobium, tantale, zirconium, beryllium, tungstène, lithium, terres rares sont ceux qui correspondent à des applications industrielles. Le rapport conseille l'« étude systématique de l'influence des impuretés sur les propriétés spécifiques de ces métaux et leurs alliages. » Pour la chimie de l'état solide, le rapport fixe des priorités pour les composés suivants : « des réfractaires spéciaux (oxydes, carbures, nitrures, etc.), des céramiques diélectriques, des ferrites, des graphites et pyrocarbures, etc. » et souligne l'importance des questions de diffusion, de frittage et de haute température dans l'état solide [MIN, 1966b, p. 106-145].

Les recommandations du rapport rappellent les idées défendues au colloque de Paris (1948), au dixième conseil Solvay, à la Maison de la chimie (1962). Les analogies employées, les domaines à développer, les méthodes à utiliser sont identiques. Il n'est donc pas vraiment surprenant de retrouver... Bénard parmi les rapporteurs du groupe de travail pour la chimie. Promu porte-parole, Bénard sert de relais entre la sphère scientifique et la sphère politique. Et il n'est pas un cas isolé : plusieurs chimistes accèdent à des positions de pouvoir : Chaudron est conseiller scientifique du CEA, Trombe est l'un des douze premiers « sages » nommés par de Gaulle... Ceci ne signifie pas pour autant que les prescriptions des scientifiques soient toujours écoutées par les décideurs politiques. Mais entre science et politique la frontière devient poreuse, des mandarins migrent du laboratoire aux commissions d'experts.

Pour la chimie de l'état solide, le rapport du Plan suit donc le message de la *Chaudronnerie* : refus épistémologique des discontinuités et acceptation sociologique des ruptures disciplinaires. Telle est l'organisation de la recherche scientifique en France : une pratique quotidienne souple arc-boutée sur des fondations institutionnelles traditionnelles. Les cadres de pensée se modifient plus vite que les cadres institutionnels bien que les premiers dépendent des seconds.

Au CNRS, l'inertie de la chimie minérale semble encore plus grande que celle des autres sous-disciplines de la chimie. En 1966-1967, lors de la première réorganisation des sections du CNRS depuis vingt ans (1946), plusieurs composantes de la physique se regroupent dans la nouvelle section 8 « physique des solides » [RA CNRS, 1967]. Trois des quatre sections de chimie sont recoupées et réorganisées suivant de nouveaux axes [Lanciano-Morandat, 1999, p. 36, p. 144]. Mais la section 12 « chimie minérale » reste en l'état ou presque : elle change simplement de numéro pour devenir la section 14 (1967-1970) puis 15 (1971-1975). Le président de la section 12 – Chaudron – cède la place à son successeur de la section 14 – Bonnier – qui la rend à celui de la section 15 – Michel –. L'annexe A.III.3 retrace l'évolution de la section chimie minérale puis chimie du solide du CNRS. À une activité fébrile de groupes informels orientés vers la chimie de l'état solide répond une structure institutionnelle stable, qui assure la pérennité de la chimie minérale.

⁹⁸ « *Métallurgie et chimie de l'état solide* » : « D'une façon générale, une meilleure connaissance des propriétés physico-chimiques de l'état solide correspond à l'un des grands besoins de la science et de l'industrie actuelles. [...] Cet intérêt est d'autant plus vif que plusieurs industries modernes (nucléaire, spatiale, etc.) exigent des matériaux de pureté très poussée ainsi que de très grande résistance mécanique sous des contraintes extrêmes (très hautes et très basses températures, très fortes pressions, etc.) ; cette amélioration nécessaire des résistances mécaniques et des propriétés physiques des solides (que ce soient des métaux ou d'autres substances, telles les fibres mono-cristallines) est un point sur lequel il est bon d'insister nettement. » [MIN, 1966b, chimie, IV]

Depuis 1963, la direction du CNRS a doté le Comité national d'un nouveau moyen d'intervention : les « recherches coopératives sur programme » (RCP). Cette mesure incitative rompt avec la logique disciplinaire, non finalisée, en encourageant des collaborations transversales, à durée limitée (3 ans), autour d'un « problème »⁹⁹ précis. Plusieurs sections peuvent participer à une RCP, qui est alors décidée conjointement au niveau du Comité national [Lanciano-Morandat, 1999, p. 19-21]. La somme allouée pour 1963 à l'ensemble des 28 premières RCP atteint 2,3 millions de francs (près de 3 millions d'euros 2006) [RA CNRS, 1963]. Même si la section de chimie minérale recourt à une recherche par « problème » dès la fin des années cinquante,¹⁰⁰ elle n'utilise pas les RCP pour fédérer des recherches sur l'état solide. Dans la première vague des RCP (1963-1966), ce sont soit les physico-chimistes (« surfaces cristallines », RCP n°19, dont Bénard est responsable), soit les physiciens et cristallographes qui prennent l'initiative de recherches sur l'état solide. Pourquoi donc la section 12 n'utilise-t-elle pas ce nouveau moyen, bien doté, pour soutenir la chimie de l'état solide ? Ce n'est pas parce que la section chimie minérale ne reconnaît pas le domaine. Elle le désigne en de multiples occasions. Le rapport de conjoncture de 1959 plaçait la « chimie de l'état solide » au premier plan de ses préoccupations. Le cinquième Plan, rédigé en 1964, y fait aussi explicitement référence. Le rapport d'activité de la section mentionne la sous-discipline « chimie de l'état solide » en 1967 puis « physico-chimie de l'état solide » en 1969 [RA CNRS, 1967 ; 1969]. Au niveau du CNRS, la « chimie du solide et des hautes températures » est d'ailleurs citée comme l'un des domaines les plus vigoureux de la chimie pour l'année 1970 [RA CNRS, 1970].¹⁰¹ Son dynamisme est donc bien reconnu mais il joue contre son émancipation puisqu'il incite les responsables de section chimie minérale à la garder dans leur giron. La stratégie visant à défendre l'intégrité du territoire (chimie minérale) dans son ensemble n'empêche pas de favoriser l'épanouissement de la chimie de l'état solide, mais sous tutelle (de la chimie minérale). Dès 1966, le CNRS accrédite la chimie de l'état solide en qualifiant comme « laboratoires associés » (LA) trois laboratoires de province qui s'en réclament. Cette triple accréditation représente 5% des laboratoires de la première vague. L'année suivante, ce sont encore deux nouveaux laboratoires et deux équipes en lien avec la chimie de l'état solide qui acquièrent ce « label de qualité » du CNRS en devenant respectivement laboratoires associés et « équipes de recherche associés » (ERA).¹⁰²

Comment interpréter ces deux logiques contradictoires : une inertie de la section chimie minérale et un plébiscite général pour la chimie de l'état solide ? Une interprétation

⁹⁹ La notion de « problème » fait référence à une proposition de la section chimie physique du rapport de conjoncture de 1959 qui la définit comme « un sujet de recherches pouvant être abordé et résolu par de multiples techniques » [RCP, 1966].

¹⁰⁰ En 1959, le rapport de conjoncture de la section chimie minérale du CNRS se fixe deux principaux objectifs en terme de moyens : « mise en œuvre d'appareils onéreux pour l'élaboration des corps à étudier [...] et pour leur examen » mais aussi la « nécessité de conjuguer l'emploi de plusieurs techniques en vue de résoudre un problème déterminé » [RC CNRS, 1959, p. 130].

¹⁰¹ « Parmi les secteurs importants de la chimie dont la vitalité a été en 1970 satisfaisante, on peut citer la chimie théorique, la spectroscopie moléculaire, la cinétique et le génie chimique, la chimie du solide et des hautes températures, la métallurgie, la chimie de coordination, la synthèse organique et la chimie des substances naturelles. » [RA CNRS, 1970, introduction].

¹⁰² Les 3 laboratoires de 1966 sont ceux de « Métallurgie et Chimie du Solide » à Nancy (association des laboratoires de Aubry, Favre, Herold), de « Chimie Minérale et Structurale » à Bordeaux (Hagenmuller) et de « Thermodynamique et Physico-Chimie Métallurgiques » à Grenoble (Bonnier, qui va devenir président de la section 14 en 1967). Ce chiffre est d'autant plus remarquable pour la chimie de l'état solide que seulement 60 des 200 premières demandes ont été acceptées au 1^{er} janvier 1966 [RA CNRS, 1966] et que deux laboratoires de chimie de l'état solide sont déjà laboratoires propres : le CECM et le Laboratoire des terres rares. En 1967, la deuxième vague contient les laboratoires « recherches métallurgiques et chimiques » aux Mines de Paris (Boullé et Lacombe) et de « chimie des solides et des hautes températures » à Toulouse (Gérard Montel, ancien élève de Chaudron). Les ERA sont le « Laboratoire de chimie de l'état solide » à la faculté de pharmacie de Paris (Flahaut) et le « Laboratoire de chimie minérale et structurale » à Strasbourg (Rohmer) [RA CNRS, 1967].

psychologique invoquerait la position des dominants des années soixante : présidents de section (Chaudron, Bonnier, Michel) et grands personnages du Comité national. Héritiers de découpages traditionnels, qui les rassurent parce qu'ils ont grandi dedans, les mandarins refusent de changer une organisation structurale qui les a rendus socialement puissants même si la science qu'ils mènent franchit en permanence les découpages universitaires. Réciproquement, s'ils ont intérêt à conserver la « chimie minérale » comme un tout cohérent, une discipline constituée, ils trouvent aussi un avantage à la domination de l'état solide par rapport à la chimie de coordination par exemple. Au sein de l'entité close, la chimie de l'état solide assure leur maintien face aux autres domaines (coordination, radiochimie, thermodynamique). Donc, si avant tout les mandarins oeuvrent à la conservation d'une structure institutionnelle à laquelle ils sont attachés (par le cœur et le porte-feuille), ils favorisent le socle de l'état solide qui leur permettra, croient-ils, de contenir l'assaut des challengeurs des autres domaines. En 1969, lorsque Chaudron reçoit la « médaille d'Or du CNRS », son œuvre est d'ailleurs présentée comme une unification de la chimie et de la métallurgie en « chimie métallurgique ». L'expression « chimie de l'état solide » n'apparaît pas dans le texte officiel du CNRS [RA CNRS, 1969, p. 15].

L'interprétation mandarinale ne suffit pas – un individu pouvant difficilement résister à un collectif car il ne peut cristalliser tous les enjeux de pouvoir du fluide social stochastique – chaque groupe de pression militant pour son pré carré. Ce qui apparaissait comme une expression générique, « chimie de l'état solide », correspond à une juxtaposition de groupes sociaux qui, loin de se fondre en une communauté monochrome, rivalisent entre eux. Au milieu des années 1960, les querelles de chapelle se neutralisent et laissent intactes la discipline traditionnelle. Les alliances entre thèmes de recherche se font ou se défont suivant les cas : phénomènes de surface/réactions volumiques, température ambiante/hautes températures, chimie physique/synthèse minérale, métaux/minéraux, oxydes/semi-métalliques, structures/propriétés physiques. Cette dispersion est sensible dans les annuaires de l'époque. En 1966, l'Université publie un *Répertoire des scientifiques français* [MIN, 1966c] qui classe les chimistes selon cent trente catégories.¹⁰³ J'ai répertorié soixante-six minéralistes étudiant les solides : ils sont rangés dans trente catégories différentes et seulement treize d'entre eux correspondent à la catégorie « Solides... y compris les méthodes par rayons X » !

Face à un tel morcellement, la « chimie de l'état solide » se pense-t-elle comme une communauté disciplinaire au milieu des années 1960 ? La question comporte deux faces. Un groupe sans conscience de lui-même constitue-t-il une entité sociale ? Réciproquement, un groupe, conscient de son identité mais qui n'agit pas collectivement, est-il une entité sociale ? Cette dualité entre infrastructure et superstructure – pour reprendre en l'adaptant la terminologie marxiste – marque la communauté de chimie de l'état solide. Celle-ci ne possède pas la confiance de la chimie physique ou de la biochimie, sections officielles du CNRS, qui réclament en 1966 à la SCF la création de deux divisions éponymes [SCF, 1966]. Et pourtant, elle tourne ! Le réseau de chimie de l'état solide s'est étoffé depuis les années cinquante et s'est structuré à travers des rencontres périodiques (à la SCF, séminaire du CEA) ou des colloques internationaux (Bordeaux en 1964, Paris en 1965). Elle a trouvé des hérauts (Chaudron, Trombe, Bénard, Collongues, Hagenmuller...) qui ont crié assez fort pour se faire entendre jusque dans l'antichambre du pouvoir politique. Elle fraie quotidiennement avec les industries stratégiques (CEA, ONERA, DGA), les milieux économiques, les laboratoires R&D des multinationales (IBM, Bell, Saint-Gobain), parcourt la planète avec une mallette d'échantillons, reçoit dans ses salons officiels les ambassadeurs internationaux et multidisciplinaires tous les après-midi sauf le mardi parce qu'il y a séance à l'Académie. Que

¹⁰³La « classification des sciences pour les spécialisations de recherche » utilisée dans le répertoire [MIN, 1966c] a été établie par la *National Science Foundation*.

faudrait-il être encore pour faire une communauté disciplinaire ? Une grand-messe œcuménique, quelques mots gravés dans le marbre des établissements, un adoubement extérieur, une armée de croyants, un territoire bien à soi, une pérennisation par l'éducation ? Il aurait peut-être fallu un bel acte fondateur, un certificat de naissance décrété, un événement net, précis et sans bavure. Malgré tous mes efforts, je ne l'ai pas trouvé. Alors, la construction historique se poursuit brique à brique, d'un réseau scientifique dynamique en train de se transformer en une communauté disciplinaire universitaire. Chaque particule de conscience scelle un peu plus la communauté agissante et chaque action cimente un peu plus la communauté pensante.

III.4.2.4. Transformations institutionnelles (1966-1979)

Malgré l'apparente pérennité des institutions protégeant la chimie minérale, des initiatives personnelles, soutenues par ces mêmes institutions, poussent vers la chimie de l'état solide. Les groupes informels se multiplient. Jean-Pierre Suchet, physicien des solides de Bellevue, lance un « séminaire de chimie de l'état solide » pour l'année 1966-1967 avec la participation active de la *Chaudronnerie* (Bénard et Michel d'abord, Collongues ensuite). Le programme pour l'année porte sur les « Liaisons interatomiques et propriétés physiques des composés minéraux ». La relation structure-propriétés dans les solides à travers la liaison chimique est au cœur des préoccupations des chimistes. L'intérêt pour la liaison chimique s'intensifie au niveau international au cours des années soixante-dix (III.3.1.3). Au séminaire, les séances commencent par un exposé et se terminent par des discussions. Elles se tiennent à l'ENSCP, dont Bénard est le directeur, et rassemblent des scientifiques de la région parisienne : physiciens du magnétisme de Bellevue, chimistes de la *Chaudronnerie* et de la faculté de pharmacie.¹⁰⁴ Les seuls provinciaux qui communiquent viennent du laboratoire Hagenmuller à Bordeaux. Significativement, aucun élève de Trombe n'est présent cette année-là. Les aspects théoriques et généraux (diagrammes de bande) sont largement développés par les physiciens (4 séances) tandis que les chimistes traitent de la synthèse et des propriétés structurales et physiques en se concentrant sur un type particulier de solide (bronzes de vanadium, spinelles, pérowskites, oxydes mixtes, nitrures, sulfures). Le séminaire « avait à l'origine pour but de confronter les travaux de différentes équipes qui se consacrent en France à l'étude de l'Etat Solide » mais permet finalement « l'établissement de relations suivies entre les équipes qui participèrent à cette œuvre collective. » (Bénard dans l'introduction de [Suchet, 1968]). Des relations entre laboratoires de physique et de chimie se mettent ainsi en place. Ce séminaire se poursuivra jusqu'en 1975 en changeant de thème chaque année et en diversifiant les intervenants. Une telle initiative favorise des contacts directs entre disciplines voisines, assure un profond brassage des influences entre familles scientifiques et ce faisant, contribue à souder une communauté de chimie de l'état solide, centrée sur la région parisienne – au début tout au moins –.

Outre ce séminaire généraliste de chimie de l'état solide, les séances thématiques à la SCF (dans les différentes sections), les *minéralistes* français organisent des congrès

¹⁰⁴ Pour les 11 séances de l'année, les communications sont assurées comme suit (entre parenthèses, le directeur du laboratoire) : 4 par le Laboratoire du magnétisme et de physique du solide (Suchet, dont 1 associée à Fayard), principalement sur les diagrammes de bande des solides ; 2 par le CECM (Michel) ; 2 par le Laboratoire de chimie minérale d'Orsay (Michel) ; 2 par le Laboratoire de chimie appliquée de l'ENSCP (Bénard, dont 1 associée à Suchet) ; 1 par le Laboratoire de chimie minérale structurale de Bordeaux (Hagenmuller) ; 1 par le Laboratoire de chimie minérale et le Laboratoire de physique de la faculté de pharmacie de Paris (Flahaut et Laruelle) [Suchet, 1968].

élémentaires.¹⁰⁵ Pour l'année 1967, en février, le CEA et l'Institut de céramique française proposent un « colloque des céramiques nouvelles ». Du 16 au 20 mai, Boullé et Montel coordonnent à Toulouse un colloque international « sur les phosphates minéraux solides » sous le patronage de la SCF et du CNRS. Chaudron, qui est l'un des parrains du projet, place le colloque de 1967 dans la continuité de celui qu'avait organisé l'IUPAC en 1954, à Münster, à l'instigation de Jolibois [BSCF, 1968]. En septembre, le CEA à nouveau organise à Saclay des « journées d'études sur les solides finement divisés ». L'année suivante, le 11 novembre, la SCF propose une « Journée sur les composés non-stœchiométriques ». J.S. Anderson ouvre la journée par une conférence « *The constitution of non-stoichiometric compounds* », qui ne cite que deux Français (Bénard, deux fois et Chevreton) [BSCF, 1969].¹⁰⁶ En 1969, Trombe, Pauthenet et Bertaut co-organisent à Paris (5-7 mai) et Grenoble (7-10 mai) un colloque international du CNRS intitulé « Les éléments des terres rares ». Les séances parisiennes sont plutôt « consacré[es] à la chimie et à la métallurgie » tandis que les séances grenobloises se concentrent sur la physique [RA CNRS, 1969, p. 113]. Cent treize communications sont présentées. Les familles Trombe (9 communications), Flahaut (4), Pâris (2), Hagenmuller (1) y côtoient les physiciens de Grenoble, du CEA, d'Orsay et les chimistes du monde entier : États-Unis, Russie, Angleterre, Suède, Italie...

Rencontres informelles, jurys de thèse, séminaires annuels, cycles périodiques, congrès élémentaires (qui se succèdent d'années en années) créent sans cesse de nouveaux liens communautaires autour d'un cœur de la chimie de l'état solide. Au mois d'août 1969, à Sydney, c'est au tour de la communauté internationale de sceller l'alliance, au vingt-deuxième congrès de l'IUPAC, en organisant un « colloque de chimie du solide » en son sein.

Ce n'est qu'en 1970 que la première RCP en lien avec l'état solide et pilotée par la chimie minérale est lancée sur l'étude des « structure et propriétés physiques de nouveaux composés fluorés » (RCP n°219, 1970-1973). Le projet, sous la responsabilité de Hagenmuller, associe le Laboratoire de chimie minérale et structurale de Bordeaux à deux autres laboratoires de chimie minérale (Montpellier et Le Mans) et le LEPM de Néel à Grenoble sur l'étude des propriétés magnétiques de fluorures ternaires [RA CNRS, 1970, p. 203]. Ironie du sort, ce sera l'une des dernières RCP. À partir de 1971, le CNRS met en œuvre un nouveau type d'incitation, les « actions thématiques programmées » (ATP). Ce faisant, il remplace un projet par problème par un projet thématique. Finalité, prévision des besoins et organisation multidisciplinaire en sont les maîtres mots.¹⁰⁷ Les ATP constituent le pendant en recherche fondamentale des « actions concertées » (AC) de la DGRST, plus appliquées, qui existent depuis 1960 [RA CNRS, 1969].

¹⁰⁵ J'étends ici *élémentaires* aux congrès qui touchent à l'état solide mais qui sont ciblés sur une question particulière (les hautes températures), un élément donné (le graphite) ou une famille d'éléments chimiques (les terres rares, les sulfures).

¹⁰⁶ La faible occurrence des références françaises se retrouve dans l'ouvrage qu'Anderson a écrit avec Emeleus : *Modern Aspects of Inorganic Chemistry* [Anderson & Emeleus, 1938]. Dans la troisième édition (1960), au chapitre 15 par exemple, « *Some interstitial and non-stoichiometric compounds* », on ne trouve aucune référence de chimiste français. Cette absence de citations suggère-t-elle un espace anglo-saxon hermétique aux influences francophone, une cécité francophobe de 'JS' ou une auto-promotion des résultats britanniques (alors qu'il a lu les auteurs français) ?

¹⁰⁷ Suite des RCP, les « actions programmées, axées sur un thème déterminé et qui portent sur la réalisation, en plusieurs années, d'un programme qui implique la mise en œuvre à titre principal de moyens d'équipement, mais également des moyens de fonctionnement corrélatifs [...] Les ATP doivent permettre :

- de mieux relier les recherches à une finalité définie et notamment à un axe de recherche déterminé ;
- de prévoir sur plusieurs années les moyens nécessaires ;
- de regrouper dans un effort commun de réflexion et de réalisation des scientifiques appartenant éventuellement à des disciplines différentes. » [RA CNRS, 1969, p. 8].

Les projets incitatifs multidisciplinaires (RCP puis ATP) sont l'un des outils de la nouvelle politique du CNRS. À partir de 1966, il s'agit de décloisonner les disciplines jugées trop étriquées pour créer un espace plus vaste, plus ouvert : le « département ». La superposition des sections de chimie constitue désormais le département des sciences chimiques [Lanciano-Morandat, 1999, chapitre II]. L'avènement du département modifie le découpage par sections qui subsiste néanmoins. Le rapport d'activité de 1973 rompt avec la logique sectorielle des rapports précédents en restructurant la chimie suivant trois axes : « chimie des interactions et interfaces », « chimie des matériaux » et « chimie moléculaire ». Ce sont les critères structuraux et de taille des objets qui discriminent désormais : la molécule, l'interface, le volume. La constitution chimique des composés étudiés, qui prévalait jusque-là, s'efface. La chimie de l'état solide telle qu'elle pouvait être définie par [Bénard, 1963], continue du ionique au métallique, de la surface au volume, se trouve réorganisée, divisée entre surface d'un côté et volume de l'autre. Celui-ci est incorporé à la chimie des matériaux, celui-là à la chimie des interfaces. Ce rapport de 1973 borne un changement institutionnel majeur : la chimie de l'état solide, à la croisée des chemins, se scinde en deux : « chimie du solide » (en volume) et chimie des surfaces (dont catalyse). Deux ans plus tard, en 1975, lorsque le Comité national réorganise pour la deuxième fois ses sections, la séparation est clairement affichée. Et en effet, la section 15 de chimie minérale disparaît. On retrouve ses membres dans deux nouvelles sections : celle de « chimie des matériaux solides » (section 11) pour la plupart d'entre eux et celle de « physico-chimie des interactions et des interfaces » (section 10) pour certains, qui sont intégrés à une communauté de physico-chimistes [Lanciano-Morandat, 1999, p. 144].

La rupture institutionnelle entre phénomènes de surface et de volume ne se produit pas *ex nihilo*. Elle a été précédée par une réorientation des laboratoires vers l'un ou l'autre des aspects.¹⁰⁸ Rares en effet sont les laboratoires qui, au début des années 1980, abordent simultanément les volumes et les surfaces des solides. Même les gros instituts – comme le CECM – se fissurent à l'interface volume-surface et font des choix stratégiques.¹⁰⁹ À partir des années soixante-dix, il faut choisir entre le solide en volume et les surfaces solides. Cette scission a une conséquence importante sur les propriétés : alors qu'au cours des années cinquante on se préoccupait autant de propriétés chimiques (réactivité) que de propriétés physiques, celles-ci sont beaucoup plus présentes en chimie du solide. La chimie de l'état solide a vécu, le rêve d'un état solide socialement unifié est mort.

¹⁰⁸ La trajectoire du laboratoire fondé par Bénard à l'ENSCP constitue un exemple type de cette évolution (ou bien c'est l'évolution qui est extrapolée à partir de l'exemple) : occupé de chimie des réactions (volumique et de surface) au cours des années 1950, le Laboratoire de chimie appliquée évolue progressivement vers la seule chimie des surfaces et devient le Laboratoire de physico-chimie des surfaces (1972) [Teissier, 2007]. Bénard est d'ailleurs vu par certains comme un métallurgiste par opposition à Collongues qui serait le chimiste du solide de la *Chaudronnerie*. En 1966, l'un des groupes de l'Institut de recherche sur la catalyse (IRC) à Lyon porte l'intitulé « chimie de l'état solide » (Y. Trambouze) [MIN, 1966a]. Or, ce groupe n'est pas du tout intégré à la communauté (aucun témoin n'en a parlé). Par un cheminement inverse, Jean Amiel, directeur du Laboratoire de chimie des solides (Paris) dans les années 1960, travaille sur des questions de catalyse et de surface des solides. Son élève Figlarz, considéré comme un chimiste du solide, fonde le Laboratoire de réactivité et chimie des solides à Amiens, parfaitement intégré à la communauté française (A.III.1). Figlarz est d'ailleurs cité par Hagenmuller comme l'un des principaux protagonistes de la communauté française [Hagenmuller, 1997].

¹⁰⁹ Un laboratoire de taille suffisante devrait pouvoir mener en parallèle des études surfaciques et volumiques, dans des équipes différentes. Le CECM pourtant montre le passage graduel d'une recherche à peu près équilibrée entre chimie minérale et métallurgie au temps de la splendeur de la *Chaudronnerie* à l'avènement progressif d'études essentiellement métallurgiques. Les départs successifs de groupes de chimistes à partir des années 1970 (Jean-Claude Gilles, Collongues, Revcolevschi, Perez y Jorba) et la retraite de Michel, épigone de Chaudron, auront raison de la chimie du solide au CECM en 1992 [Teissier, 2006].

En 1976, Hagenmuller est élu président de la nouvelle section « chimie des matériaux solides » (1976-1979). Depuis le début des années soixante-dix, il se fait le chantre de la chimie du solide et lie sa destinée à la sienne. Jusqu'en 1973, l'unité associée qu'il dirige à Bordeaux s'appelait « Laboratoire de chimie minérale et structurale ». Elle devient unité propre et change de nom pour « Laboratoire de chimie du solide ». Or, l'accréditation d'un laboratoire propre dans un nouveau domaine constitue un signe fort de reconnaissance par le CNRS.¹¹⁰ Dès novembre 1975, Hagenmuller milite à la Société chimique de France pour la création d'une division de chimie du solide.¹¹¹ Il parvient à ses fins l'année suivante, en novembre, lorsque la division de chimie physique et minérale (dirigée par Collongues) est coupée en deux : « Chimie du solide et métallurgie » d'un côté et « Chimie de coordination » de l'autre [SCF, 23-11-1976]. Hagenmuller devient là-aussi le premier président de la division de chimie du solide (1977-1978), secondé par l'un de ses anciens élèves, Alain Tressaud. Les mandats suivants sont assurés par Deschanvres¹¹² (président) et Bernard Raveau (secrétaire) (1979-1981) puis par Rouxel (président), Caro (vice-président) et M. Palvadeau (secrétaire). La *Chrétienté*, qui peinait pour avoir droit de cité en chimie de l'état solide au cours des années cinquante, s'est confortablement installée aux commandes institutionnelles de la chimie du solide française à partir du milieu des années 1970. Hagenmuller en est le personnage central. D'autres mandarins sont influents – Trombe, Michel, Collongues, Fayard, Rouxel –, toujours élus au Comité national lorsqu'ils se présentent. C'est une grande famille. Dans les commissions se déroulent de vraies luttes de pouvoir, les rapports de force sont larvés et les oppositions larvées ou frontales suivant la personnalité des gens. Une étude de mœurs à raconter.¹¹³ Entre un népotisme national et une propagande internationale, Hagenmuller cherche à marquer les esprits. À force de répéter le nom de la « chimie du solide », l'expression pénètre les esprits et s'y inscrit. Il inscrit aussi la « chimie du solide » dans les institutions au CNRS (laboratoire propre, président de section) et à la SCF (président de division), et au-dessous, y appose sa signature. Il coordonne ce qui existe et fait croire qu'il fait exister ce qui coordonne. Il veut rassembler dans une course à l'image percutante. Devançant la politique européenne du CNRS – qui commence vers 1984 [Lanciano-Morandat, 1999, p. 110] –, il co-organise avec Klemm le premier congrès européen de chimie du solide à

¹¹⁰ « Le développement important de cette branche de la chimie [la chimie du solide] a conduit à la création en 1974 d'un laboratoire propre de « chimie du solide » à Bordeaux. » [RA CNRS, 1974, p. 107]. La demande de création d'un Institut de chimie du solide à Bordeaux est développée dès 1969 [RC CNRS, 1969, chimie, p. 20-21]. Suivant [Lanciano-Morandat, 1999, p. 65], la création d'un gros laboratoire propre dans chaque « sous-discipline » est un acte fort de la direction du CNRS, qui ainsi peut mener une politique scientifique.

¹¹¹ À la séance du 18 novembre 1975, « M. Hagenmuller souhaite créer un organisme regroupant les personnes qui s'intéressent à l'état solide : nouvelle division de la S.C.F., groupe de travail ou organisme pris en charge par le CNRS. » [SCF, 18-11-1975]. Cinq mois plus tard, en avril 1976, son choix s'est fixé sur la SCF puisqu'il « attire, à nouveau, l'attention sur l'opportunité qu'il y aurait à créer une nouvelle Division dans le cadre de la [SCF] pour les minéralistes de l'état solide. » [SCF, 13-4-1976].

¹¹² « Parmi les contemporains d'Hagen, un chimiste qui m'a beaucoup impressionné aussi par sa rigueur, sa qualité scientifique, son honnêteté intellectuelle, c'est Alfred Deschanvres, le patron de Raveau. Il fait partie de ces normaliens discrets et efficaces qui ont marqué leur discipline mais il est mort très tôt. Il a laissé sa trace manifestement. Il n'avait pas le dynamisme d'Hagenmuller en ce qui concerne l'ouverture et la communication mais il était rigoureux et ouvert. » [Tournoux, 2005, p. 9-10].

¹¹³ « Il y a eu deux grands professeurs, presque des mandarins, en chimie du solide, avec des stratégies totalement différentes. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 1]. Trombe « était le grand patron, il y avait une distance par rapport à moi mais avec les autres étudiants aussi je crois. [...] il nous impressionnait aussi. Mais tous ceux de la génération de Trombe étaient pareils. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 4]. « Tout cela donne l'impression d'une grande famille, avec un patriarche, genre Dominici, un autre beaucoup plus subtil qui est Collongues, dans laquelle il fallait se débrouiller. On appelait Rouxel, le "cardinal" parce qu'il arrivait à se faufiler dans tous ces méandres. C'est une vraie étude de mœurs ! (rires). Si un jour vous voulez écrire un roman, il y en a un ! Je n'ai pas vécu Bordeaux mais il y avait beaucoup de pression, c'était vraiment dur. Hagen n'a peur de rien. » [I Lucas, 2005, p. 7]

Strasbourg en 1978. Corrélativement, la *Chaudronnerie* a perdu sur le terrain social : Chaudron décède en 1976, Michel prend sa retraite en 1978, Bénard s'est tourné vers la chimie des surfaces et les délices de l'Académie. Collongues se trouve promu porte-étendard de la famille pour la chimie du solide. Mais il n'a pas les ambitions fondatrices de son adversaire. En 1977, lorsqu'il co-organise avec Fayard un colloque international du CNRS : « *Order-Disorder in Solids* », le but n'est pas de forger une communauté scientifique, de façonner les esprits mais plutôt de faire se rencontrer autour d'un phénomène commun des spécialistes de communautés différentes.

Au cours des années cinquante puis soixante, la chimie de l'état solide repose sur un large territoire. La *Chaudronnerie* défendait l'idée d'un état solide unifié qui irait des métaux aux composés ioniques en associant les phénomènes volumiques et les interfaces. Cette notion épistémique, portée par un réseau européen dynamique mais peu institutionnalisé, a finalement été vaincue socialement par la logique de spécialisation, qui réorganise la chimie universitaire entre 1960 et 1970. En état solide, la chimie des interfaces se distingue désormais clairement de la chimie (volumique) du solide. Le CECM, qui en France était le symbole d'un état solide unifié, se replie de plus en plus sur les métaux à partir de 1972 (départ de Collongues). Vers 1973, le vaste territoire de la chimie de l'état solide est démantelé entre plusieurs sous-disciplines : métallurgie chimique, qui se rapproche peu à peu de la métallurgie physique, chimie des interfaces et, enfin, chimie du solide. La spécialisation de la chimie favorise le démantèlement de la chimie de l'état solide, qui s'accompagne d'une institutionnalisation de la chimie du solide. Au milieu des années 1970, la chimie du solide s'impose dans le paysage national comme un secteur stratégique, reconnu par les institutions académiques, les sociétés savantes et les industries.

En 1974, le CNRS et la DGRST ont diligenté une commission d'enquête, rassemblant une vingtaine de *solidistes* et de métallurgistes, pour définir les orientations à prendre dans l'avenir. Entre octobre 1974 et mars 1976, le « groupe de prospective de chimie du solide et de métallurgie » mène une vaste campagne de consultations auprès de « deux cent cinquante experts » (chimie, physique, industrie) puis rédige un rapport remis en 1977 [CNRS-DGRST, 1977]. Ce rapport constitue trois informations cruciales pour l'historien. Le projet conjoint prouve d'abord l'intérêt porté par les acteurs de la politique scientifique aux solides, minéraux et métalliques, associés ici comme dans les sections du CNRS (section 15 avant 1975, section 11 après). Jusque-là, seules la chimie moléculaire et l'électrochimie avaient fait l'objet d'un rapport de ce genre. La chimie du solide a donc bien pris une nouvelle dimension au milieu de la décennie. Deuxièmement, le discours constitue un sondage de la communauté de chimie du solide française au moment-clé de l'accession aux institutions nationales. Troisièmement, sitôt rendu, le rapport de prospective devient un outil de politique scientifique pour le CNRS, la DGRST, la commission du Plan. Borne historique aujourd'hui, il a d'abord servi de discours descriptif, prescriptif et normatif. Le premier point justifie a posteriori le découpage temporel adopté ici (III.2, III.4) tandis que le troisième constituera une piste à comparer aux discours des décideurs politiques (III.4.3). Avant de poursuivre, je vais m'arrêter un instant sur le deuxième point et comparer la définition de la chimie du solide donnée par le rapport de prospective en 1977 – que j'appellerai « œcuménique » puisque issue du consensus de la commission d'enquête – avec celle de la « matrice disciplinaire », synthèse de quatre témoignages individuels à la fin des années soixante-dix (III.2.2).

Le rapport définit la chimie du solide française comme une « discipline ouverte » sur trois extérieurs : industriels, internationaux, disciplinaires, tout en restant encore majoritairement publiée en langue vernaculaire dans les revues internationales. Son dynamisme doit beaucoup plus à des initiatives internes, des alliances efficaces qu'à

d'éventuels choix de politique scientifique. Soutenue depuis peu de temps par le CNRS, la chimie du solide n'a fait l'objet d'aucune « action concertée » de la DGRST malgré son « insertion industrielle importante » et n'a été soutenue qu'à partir du VI^e Plan (1971-1975).¹¹⁴ Le rapport précise enfin que la vitalité seule de la discipline ne suffit plus désormais et il appelle un soutien politique.

Le groupe de prospective, guidé par un double respect des besoins de la société et de l'autonomie du chercheur, dégage les idées-forces suivantes. Approches appliquées et fondamentales, loin d'être antinomiques, sont inséparables l'une de l'autre au sein de la chimie du solide et métallurgie. Le *solidiste* devrait donc porter une attention particulière aux « solides réels » avec le double objectif de compréhension des phénomènes et de mise en valeur des performances. Le solide se dédouble en « matériau », objet cognitif et utile. Pour atteindre l'objectif cognitif, il est encore nécessaire de travailler sur le solide le plus simple, dit « idéal », très souvent un « monocristal » avec le moins de défauts possibles. Les phénomènes de réactivité (formation, destruction, cristallogenèse, diffusion) peuvent ainsi être étudiés plus facilement. Dès que possible par la suite, il faut revenir au matériau réel, l'influence des défauts, pour envisager la relation entre structure et propriétés à travers le concept-clé de « liaison chimique ». Cette relation n'est plus vue comme la conséquence de la fabrication du solide mais plutôt comme sa cause : le chimiste doit garder en tête le « caractère prévisionnel » de son travail. Il synthétise en pensant aux propriétés qu'il désire obtenir et non pas pour obtenir un composé nouveau. Le systématique doit céder le pas devant le prévisionnel. La théorie pourtant est à utiliser avec circonspection malgré son utilité en modélisation. L'importance accrue des solides non cristallins, verres et amorphes, va de pair avec l'étude de l'ordre à courte et moyenne distances. L'énergie (transport et stockage) apparaît comme le domaine actuel où le chimiste du solide peut valoriser au mieux son travail vis-à-vis de la société en passant par l'industrie.

Au-delà du prescriptif, le rapport décrit les rapports que la chimie du solide entretient avec l'instrumentation – qui, même si le rapport ne le mentionne pas, peut être vue comme une quatrième interface de la chimie du solide. Déterminer la structure atomique par diffraction des rayons X devient une activité de « routine ». Pour les techniques de pointe, plus onéreuses, caractérisation analytique, microscopie électronique, calculs thermodynamiques, les laboratoires doivent partager les lieux d'implantation suivant la compétence des équipes. Cette activité aux interfaces influence l'organisation de la recherche. Il s'agit au moins d'encourager « les coopérations » ponctuelles suivant les sujets, au plus de créer des équipes intégrées, polyvalentes, voire pluridisciplinaires – même si c'est le vœu n'est pas très explicite. Dans la séquence classique : préparation, structure, propriétés, le solidiste occupe une position centrale qui implique collaboration avec le mécanicien, avec l'électrochimiste, avec le physicien du solide, avec le minéralogiste ou géochimiste, avec le biochimiste du solide. À ces collaborations entre laboratoires, il faudrait ajouter des décloisonnements dans l'enseignement, les sociétés savantes, les colloques communs [CNRS-DGRST, 1977, préface & introduction].

¹¹⁴ L'absence de soutien pour la chimie du solide et la métallurgie n'est pas aussi complète que ne le suggère le rapport de prospective. Le rapport du V^e Plan stipule que le IV^e Plan a déjà permis pour la « Chimie minérale », le « regroupement des laboratoires de Vitry et création du centre de chimie des hautes températures d'Orléans », qui sont deux entités proches de la chimie du solide et métallurgie [MIN, 1966b, p. 111]. D'autre part, « la métallurgie et la chimie de l'état solide » sont explicitement mentionnées par le V^e Plan comme des domaines à développer en raison de besoins scientifiques et industriels (III.4.2.2). Le Plan propose aussi des améliorations et créations de laboratoire pour l'ENSCP, Lille, Nancy, Toulouse, Strasbourg et Grenoble [MIN, 1966b]. Est-ce à dire que les mots n'ont pas été suivis d'effets en terme de financements et de moyens ou que le groupe de prospective emploie une rhétorique persuasive auprès des décideurs politiques ?

La définition « œcuménique » de la commission d'enquête contient de manière plus détaillée les principales caractéristiques de la « matrice disciplinaire », issue des notices individuelles de Flahaut [1976], de Hagenmuller [1978] et de Collongues [1979]. Rien d'étonnant à cette coïncidence étant donné que Hagenmuller est président du groupe de prospective, Caro, Collongues et Flahaut et plusieurs membres de la *Chaudronnerie* en sont membres permanents.¹¹⁵ Chacun milite au sein du groupe pour faire accepter son point de vue, point de vue qu'il conserve en l'espace d'un ou deux ans et que l'on retrouve donc dans les notices. La définition résultante est issue d'un consensus qui tient compte des rapports de force. La « liaison chimique », l'une des obsessions de Flahaut et de Hagenmuller, est largement représentée au sein de la définition « œcuménique ». Collongues, qui réussit à imposer l'idée de « matériaux réels », s'incline sur la double relation Structure → Propriétés → Applications dont la polarisation est inversée selon le « caractère prévisionnel », cher à Hagenmuller...

Cet exemple montre comment à partir de points de vue individuels, locaux et divergeant, un consensus s'est formé autour d'une définition œcuménique. La mise en place d'un tel groupe de prospective stabilise la communauté à trois niveaux. Premièrement, l'écriture collective d'un rapport consensuel attache les participants à cette œuvre commune. En effet, malgré les différences d'influence entre les mandarins et les autres, chaque membre de la commission d'enquête a l'impression d'avoir contribué à forger le consensus au cours des discussions. Une fois la définition fixée, chaque participant est alors plus enclin à s'en faire l'avocat (puisque'il a participé à sa rédaction). Deuxièmement, en rendant une définition de la chimie du solide, la commission d'enquête, en raison de sa légitimité sociale (caution du CNRS, de la DGRST et des mandarins), produit un discours normatif. Désormais, la chimie du solide est clairement définie par les conclusions du rapport. La commission d'enquête, socialement légitimée, normalise un ensemble épistémologique. À la lecture du rapport, les solidistes seront un peu plus pénétrés par cette normalisation. La « matrice disciplinaire » est ainsi acceptée par de plus en plus de gens. Enfin, troisième effet, le caractère prescriptif de la définition va encourager ceux qui veulent rester « modernes » à faire de la chimie du solide comme il est spécifié dans les conclusions de l'enquête, c'est-à-dire à rendre effective la norme proposée par quelques-uns – l'aristocratie – après consensus. La « matrice disciplinaire » est ainsi adoptée par de plus en plus de gens. De manière schématique, la normalisation s'opère au sein de la commission d'enquête par discussion et pression, au sein de la communauté par respect d'une légitimité sociale, au sein de la société par confiance en l'expertise scientifique.

En une trentaine d'années, de la fin de la décennie quarante à la fin de la décennie soixante-dix, on est passé d'un réseau informel de chimie de l'état solide, basée sur une continuité épistémologique, à l'affirmation d'une « communauté scientifique pertinente » de chimie du solide, minéral et volumique. Le mouvement est progressif, collectif. Au cours des années cinquante et soixante, l'explosion démographique de la recherche publique et diverses influences étrangères remodèle la disposition traditionnelle des disciplines. En particulier un mouvement de spécialisation s'opère dans toutes les sous-disciplines de la chimie. Les solides minéraux séduisent de nombreux jeunes chercheurs en raison du charisme de leurs apôtres et

¹¹⁵ La liste complète des membres du groupe de prospective est la suivante (je rajoute les initiales et entre parenthèses le laboratoire quand je les connais) : A.-M. Anthony (CRPHT, Orléans), M. Bernard (ingénieur en chef du CNET), E. Bonnier (thermodynamique, Lyon), P. Caro (LTR, Bellevue), R. Collongues (LCAES), El Gammal, J. Flahaut (Chimie minérale et structurale, Faculté de pharmacie, Paris), C. Goux (CECM), Gremillet, P. Hagenmuller (LCS, Bordeaux), Hollan, Joubert, Lefevre, J. Livage (Spectroscopie du solide, Paris 6), Marais, Merenda, Meyer, A. Michel (CECM), J. Oudar (Physico-chimie des surfaces, ENSCP), M. Pouchard (LCS, Bordeaux), M. Traverse (Toulouse), Tricot, Veilex [CNRS-DGRST, 1977].

des possibilités scientifiques qu'ils présentent : originalité des synthèses, fascination pour les hautes températures, puissant ressort de la relation structure-propriétés, importance des applications. Vers 1980, la chimie du solide a pénétré les institutions – universitaire, société savante, académie – et a réussi à stabiliser quelques dogmes et à faire accepter sa « matrice disciplinaire » à un nombre croissant de chimistes.¹¹⁶ De quelques dizaines d'individus vers 1950, on est passé à une quarantaine de laboratoires (soit un petit millier de membres) trente ans plus tard. Pourtant, au moment même où sa « matrice disciplinaire » est la plus clairement exprimée, l'image de la communauté de chimie du solide se brouille au niveau de la politique scientifique et de la sphère économique. Les « matériaux », *challenger* anglo-saxon, viennent concurrencer sur ses terres le solide minéral, à son apogée.

III.4.3. La chimie du solide à l'heure anglo-saxonne du « matériau » (1969-1985)

III.4.3.1. La mode *sixties* des matériaux

Au cours des années 1960, avant d'être affectée par un ébranlement des choix de société, la science occidentale s'active fébrilement autour des composés solides. Physiciens, cristallographes, chimistes et métallurgistes se croisent sur les problématiques et les phénomènes de l'état solide. Aux États-Unis, le mouvement se construit principalement autour du concept de « matériau », c'est-à-dire d'un solide, pensé comme utile et qui doit devenir utilisable (VIII.2.2). À l'époque, cette approche états-unienne est perçue en France par les universitaires de l'état solide, qu'ils soient physiciens ou chimistes.¹¹⁷ Mais c'est surtout au niveau du discours politique que le mot « matériau » va faire recette. Le V^e Plan, rédigé entre 1964 et 1966, mentionne la nécessité de développer certains « matériaux » stratégiques [MIN, 1966b]. En janvier 1965, le ministre d'État chargé de la recherche scientifique et des questions atomiques et spatiales, M. Palewski, préside une séance solennelle à la Société chimique de France. Devant l'aréopage de la chimie française, il insiste sur la « situation nouvelle », depuis une dizaine d'années, pour la chimie minérale et la métallurgie, confrontées aux « exigences [...] de nombreuses industries d'avant-garde [...] en matière de matériaux spéciaux. » Il évoque tour à tour les industries nucléaire, électronique, aéronautique, spatiale, la catalyse et annonce des moyens considérables dans le V^e Plan (1966-1970) pour développer l'industrie chimique [Palewski, 1965]. La France n'est pas un cas isolé à l'Ouest. L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), créée en 1961, place les matériaux au cœur de ses priorités à la fin des années 1960.¹¹⁸ Ils représenteraient entre dix et vingt-cinq pour cent des dépenses R&D de ses États membres [OCDE, 1972, p. 23]. Dans ce discours technocratique, le matériau prend une double valeur, comme « substance » (matérielle et cognitive) mais comme « emploi » (social), ce qui le place entre science et société. La science des matériaux y est définie comme « l'ensemble des

¹¹⁶ La propagande en faveur du dogme passe par aussi par l'enseignement et par la tenue de conférences dans diverses universités. Ainsi Collongues fait deux conférences sur la chimie de l'état solide en 1954 à Nancy et en 1966 à Toulouse [BSCF, 1966].

¹¹⁷ « Au milieu des années 60 [des] instituts universitaires de matériaux » sont installés de manière plus ou moins durable dans les universités états-uniennes [I Friedel, 2001, p. 2]. Le premier congrès de science des matériaux, qui se tient à Boston, en 1963, est rapporté au *Bulletin* par Michel, qui s'y est rendu [BSCF, 1966].

¹¹⁸ Les matériaux sont avec le cerveau et l'informatique l'un des trois domaines choisis par le pouvoir politique à l'issue de la Conférence ministérielle sur la Science, qui se tient en 1968 [OCDE, 1972, p. 7].

connaissances sur les relations entre la composition et la structure d'une part, les propriétés (chimiques, physiques, mécaniques, etc.) d'autre part. ».¹¹⁹ La synthèse est orientée vers l'application et réciproquement l'application influence la synthèse, les matériaux introduisent donc l'idée d'une rétroaction ou « *feedback* ». Une telle relation organique modifierait la linéarité d'un hypothétique « mode 1 » entre science et société [Gibbons & al., 1994].

Parallèlement à la polarisation duale de la matière, les États-Unis réorganisent leur système de recherche. Les matériaux sont étudiés dans des instituts de science des matériaux, qu'ils soient publics ou privés. En une dizaine d'années (1959-1969), un tiers des universités américaines abritent des laboratoires estampillés « *Materials science* ». ¹²⁰ En 1973, la *Materials Research Society* est créée. Face au rôle moteur joué par les États-Unis en science des matériaux, certains observateurs ont fortement insisté sur l'approche interdisciplinaire qu'elle mettait en avant, sans critiquer l'aspect rhétorique de la manœuvre. Ce faisant, ils ont eu tendance à dévaloriser l'approche européenne continentale, considérée comme en retard [Cahn, 2001 ; I Friedel, 2001]. Pourtant, l'option états-unienne peut aussi être comprise comme un mode local de développement [Bensaude, 2001 ; Bensaude & Hessenbruch, 2004]. L'Ancien Monde se développe sur d'autres bases : plus disciplinaires (physique, chimie, métallurgie), performantes néanmoins. Les options européennes, en particulier françaises, constituent alors un autre mode local de développement avec d'autres choix méthodologiques. La vitalité des communautés française et allemande confirme la spécificité européenne (VIII.2.1). La chimie minérale devenant chimie de l'état solide puis chimie du solide porte très tôt et de manière informelle une dynamique interdisciplinaire en lien avec des problématiques industrielles (II.4, III.4.1). Spécificité ne signifie pas indépendance. C'est pourquoi il est intéressant de voir dans quelles mesures, en France, la chimie de l'état solide puis la chimie du solide sont influencées par la vague atlantique « science des matériaux ».

III.4.3.2. Impact du matériau sur l'idéologie scientifique au tournant de 1970

Les États-Unis exercent un pouvoir de fascination sur la vieille Europe Je chercherai d'abord à repérer l'impact institutionnel de la science des matériaux sur l'organisation des sciences physiques.

C'est en 1969 que le terme « matériau » commence à être massivement employé par la section de chimie minérale [RC CNRS, 1969, section 14]. Ce qu'on avait coutume de nommer « composé solide » est désormais appelé « matériau ». Le chapitre III du rapport, décrivant la « place de la discipline [chimie minérale] dans le contexte international », prend l'étranger comme référence pour critiquer la situation nationale où le système est inadapté à la « science des matériaux » : manque de liens entre recherche fondamentale et industrie, « enseignements traditionnels » inappropriés, place restreinte accordée à la chimie minérale. La chimie du solide française fait pourtant partie des domaines « internationalement reconnu[s] », même si le rapport d'activité demande plus d'« études physiques ». ¹²¹ Les chimistes de l'état solide (y

¹¹⁹ Le rapport précise « Bien entendu, le mot "structure" recouvre les inhomogénéités non aléatoires à toutes les échelles concernées. On prend de plus en plus conscience de l'importance d'une caractérisation approfondie des matériaux ainsi que de la façon de les obtenir ; les processus par lesquels on obtient des compositions, des structures et des textures particulières sont en effet souvent complexes et délicats. » [OCDE, 1972, p. 20].

¹²⁰ « From 1959, then, the department of materials science at Northwestern University taught graduates the new, broad discipline, and an undergraduate course for materials science and engineering majors followed in due course. [...] by 1969, some 30% of America's many university departments of metallurgy carried a title involving combinations of the words 'materials science' and 'metallurgy'. » [Cahn, 2001, p. 5].

¹²¹ « On peut regretter qu'à l'inverse de ce que l'on observe dans les autres pays développés, l'incitation industrielle aux recherches fondamentales n'atteigne pas en France le niveau souhaitable. A ceci s'ajoutent

compris métallurgie) « doivent avoir des contacts encore renforcés avec les physiciens du solide et les cristallographes » [RC CNRS, 1969, section 14, p. 15]. La section chimie minérale valorise les « contacts interdisciplinaires » par projet (RCP ou actions concertées) mais refuse « en l'état actuel des choses » le transfert de groupes de chimistes vers des laboratoires de physique. Ainsi, les solidistes choisissent une option mixte entre le cloisonnement traditionnel français (entre physiciens et chimistes) et la science des matériaux à l'américaine (instituts avec physiciens et chimistes mélangés en instaurant une collaboration multidisciplinaire étroite entre deux entités, qui restent distinctes au niveau institutionnel. Consciente de sa valeur, la chimie du solide française tient à augmenter ses caractérisations physiques mais aussi à conserver sa spécificité vis-à-vis des physiciens et du mode anglo-saxon (même si elle l'utilise à des fins de propagande).

Le rapport de la nouvelle section de « physique des solides » [RC CNRS, 1969, section 8, p. 9-10] s'accorde avec les minéralistes sur l'importance croissante des matériaux et la nécessité de décroisonner les disciplines : la section veut intensifier ses liens avec la minéralogie et cristallographie, la chimie minérale, l'optique et physique moléculaire. La critique se veut plus sévère : les liens entre physique et chimie sont trop distendus en France ; la solution est plus radicale : il faut, sans attendre, rapprocher chimistes (« les chercheurs qui préparent ») et physiciens (« ceux qui étudient ») au sein de mêmes institutions sur le modèle des « laboratoires de matériaux ». Au passage, les physiciens écorchent le modèle états-unien en oubliant la deuxième partie de l'expression « *Materials Science and Engineering* » puisqu'ils ne mentionnent pas l'incorporation des ingénieurs chimistes, électroniciens, mécaniciens, etc. [Cahn, 2001]. Le remaniement proposé par les physiciens doit être appliqué à la métallurgie. La « métallurgie chimique » et la « métallurgie physique », qui sont traditionnellement disjointes en France (laboratoires et sections CNRS), doivent désormais travailler de manière intime, « selon les mêmes critères », en insérant des équipes de métallurgie physique dans des laboratoires de métallurgie chimique et vice-versa.¹²² La solution proposée n'est donc pas la parité physicien-chimiste-ingénieur comme dans les instituts anglo-saxons mais une insertion d'une équipe dans une structure plus grosse.

Pourquoi une telle divergence entre physiciens et chimistes sur la stratégie de développement ? Après la Deuxième Guerre mondiale, le modèle anglo-saxon dispose d'un énorme prestige parmi les physiciens français [Dahan & Pestre, 2004]. Les physiciens français éprouvent un sentiment de « retard », qu'ils expriment ici pour la métallurgie physique [RC CNRS, 1969, section 8, p. 10]. Au contraire, les chimistes de l'état solide puis les solidistes se sentent en position de force sur la scène internationale. Ils sont donc moins enclins à se remettre en question que les physiciens qui se sentent un retard par rapport à la compétition internationale. Il y a une autre raison, propre aux relations universitaires entre physique et chimie, qui tient au rôle qui est assigné à chacun dans la collaboration. Pour le physicien, la collaboration se fonde sur une division du travail entre ceux qui élaborent (les chimistes) et

l'inadaptation à la science des matériaux, des enseignements traditionnels et le peu de place qui a été réservé à la chimie minérale dans la planification de la recherche, contrairement à ce qui se passe à l'étranger. Dans certains domaines pourtant, les recherches françaises sont d'une qualité internationalement reconnue : ultra-purification, chimie des sels, chimie du solide. Dans ce dernier domaine, comme d'ailleurs en métallurgie, un effort est à consentir pour élever le niveau des études physiques. » [RC CNRS, 1969, section 14, p. 14].

¹²² « *métallurgie chimique* : l'élaboration de matériaux connus ou nouveaux, les études thermodynamiques (diagrammes de phase, mesure d'énergie interne et d'entropie) ; les réactions chimiques à l'état solide ou liquide ; les problèmes de réactions superficielles, de fusion-solidification ; l'emploi des méthodes de caractérisation (analyse, rayons X, neutrons, microscopie, résonances, mesures magnétiques, effet Mössbauer, etc.).

métallurgie physique : les propriétés des phases dépendant de leur structure électronique ; la structure atomique et électronique et les propriétés des défauts ponctuels et impuretés, des dislocation, macles, joints de grain, des surfaces ; les propriétés physiques macroscopiques sensibles aux défauts (fragilité, plasticité, fluage, frittage, diffusion, effets d'irradiation). » [RC CNRS, 1969, section 8, p. 10].

ceux qui étudient (les physiciens). Vu le déséquilibre à leur détriment, les chimistes pensent qu'il vaut mieux se protéger en restant dans des laboratoires séparés et collaborer ponctuellement quand c'est nécessaire. L'exemple du Laboratoire de physique des solides d'Orsay est caractéristique. Dès les années 1960, une équipe de chimistes travaille parmi les équipes de physiciens, en surnombre. Le laboratoire est rapidement leader de la communauté de physique des solides. Si le physicien se loue de la coopération, le chimiste importé regrette quant à lui le rôle subalterne qu'on lui fait jouer dans la collaboration.¹²³ Dans cette organisation, le chimiste est au service du physicien. Pour l'Europe, il semble que ce soit le point de vue des chimistes qui l'ait emporté puisqu'en 1972, l'OCDE conseille plutôt la formation de « surstructures », c'est-à-dire de coopérations entre laboratoires ou entre départements, que la création de nouvelles structures intégrées [OCDE, 1972]. Contrairement aux États-Unis, l'option européenne va dans le sens d'une collaboration entre disciplines plutôt que vers la fusion disciplinaire au sein d'une même institution. Elle correspond à un choix de réorganisation sociale minimale.

Les rapports de conjoncture de 1969 – chimie minérale, physique des solides, cristallographie et minéralogie – insistent tous les trois sur le rôle central que joue désormais le matériau. Cette préoccupation fait écho aux incitations politiques, l'OCDE par exemple appelant une entrée de l'« état d'esprit matériaux » à l'université [OCDE, 1972, p. 31]. Pour les physiciens et les cristallographes, les métaux sont les solides les plus étudiés.¹²⁴ Ils sont le fer de lance des matériaux. Ainsi, la DGRST lance une action concertée de métallurgie sur les matériaux de structure (1970-1971) dirigée par un physicien, Friedel. Les pouvoirs publics veulent mener une politique scientifique cohérente autour de nouveaux solides utilisables. La thématique matériaux est élargie aux autres types de solide quand le CNRS lance ses premières ATP matériaux¹²⁵ : « Matériaux » (1973-1974), « Objectif Matériaux » (1974-1975), « Matériaux permettant des études physiques nouvelles » (1974-1975), « Relations entre structure et propriétés des espèces chimiques » (1975-1976), « Stockage chimique de l'énergie » (1976-1977)... [Lettres bleues, 1974]. Cette tendance à la gestion de la recherche est accrue à partir de 1973 par la crise énergétique (V.2). L'année suivante, en 1974, la question énergétique est la priorité des chimistes du CNRS [RA CNRS, 1974, p. 106]. En France, la fin des

¹²³ « À Orsay, notre laboratoire de physique des solides a [...] implant[é] de petites équipes de chimistes d'abord dans la production d'alliages métalliques, puis de cristaux liquides, enfin de composés organiques conducteurs. Si ces groupes ont été très utiles, il a été parfois difficile de défendre leurs membres avec succès dans leur commission CNRS respective. » [I Friedel, 2001, p. 3]. Parlant du cas des cristaux liquides, de Gennes donne la proportion : « *we did have chemists in the Orsay group Liébert, Strzelecki and Keller, three chemists. They did a lot, especially in polymerizing liquid crystals structures in order to get stable structures. They had their own lab. We had a cluster of seven laboratories on liquid crystals and they were one of the seven.* » [I de Gennes, 2002, p. 1]. Le chimiste voit l'envers du décor : « c'est simple si on met collaborer entre guillemets, quand je leur fournis des gros cristaux – c'est un travail technique et pas de recherche pour moi – tout marche très bien. » [I Moradpour, 2006, p. 6].

¹²⁴ Le rapport de la section 8 insiste lourdement sur la distinction entre métallurgies physique et chimique et rappelle que la « métallurgie physique [est un] secteur qui intéresse particulièrement la commission de physique des solides. » [RC CNRS, 1969, section 8, p. 10]. Celui de la section 9 est encore plus explicite : « le cristallographe intervient dans les études des réfractaires, des ciments, des minéraux naturels, et naturellement des métaux (la métallurgie représentant quantitativement la partie la plus importante). » [RC CNRS, 1969, section 9, p. 50].

¹²⁵ « En France, les matériaux ont émergé officiellement en 1970-71. J'étais alors le premier président physicien (et non chimiste) d'une Action Concertée en Métallurgie de la DGRST [...]. En se séparant en 1971, cette Action Concertée de Métallurgie a laissé un rapport émettant le vœu qu'une Action Concertée Matériaux pour la recherche lui succède, en suggérant un premier programme. Sous la direction de Pierre Aigrain, ce projet a été accepté par la DGRST. Le CNRS a suivi très rapidement en créant les premiers programmes de recherche intersectoriels, destinés à jeter des ponts entre les départements. Celui des matériaux, l'un des plus importants et des plus stables, a longtemps été dirigé par Jean Hanus. » [I Friedel, 2001, p. 2]

« Trente Glorieuses » [Fourastié] réduit les crédits de la recherche publique. De 1968 à 1975 – ce qui correspond à peu près au quinquennat de Georges Pompidou –, la dépense intérieure en recherche et développement passe de 2,1% à 1,8% du PIB. Pourtant les matériaux restent l'une des priorités de la politique scientifique. En 1980, le *Livre blanc sur la recherche*, commandé par Valéry Giscard d'Estaing à l'Académie des sciences, place la « science des matériaux » parmi les cinq « problèmes de notre temps » [MIN, 1980, p. 244].

Durant la décennie soixante-dix, le concept générique de « matériaux » participe à la réorganisation des sciences physiques en remodelant ses frontières intérieures. La chimie est désormais pensée comme « la science des matériaux et des substances [et des] interactions entre ces substances ». Conséquemment, elle est divisée en trois domaines : « chimie du solide, chimie des interactions et des interfaces, chimie moléculaire et biologique » [RC CNRS, 1974, chimie, p. 5]. La chimie est donc découpée selon deux axes : volume contre interface, solide contre molécule.¹²⁶ Ce sont désormais la taille et la structure des objets qui servent de démarcation en chimie et non plus l'élément chimique (comme en 1950). Par sa structure plastique, la chimie est présentée comme une « science de transfert » en extension [RC CNRS, 1974, chimie]. Paradoxalement, c'est l'avènement d'un concept transversal, celui de matériaux, qui justifie a posteriori la scission d'une chimie de l'état solide en une chimie du solide – volumique – et une chimie des interfaces – surfacique –. Tout en profitant des nouvelles priorités énergétiques, la chimie du solide se réorganise autour d'une réalité essentiellement volumique. C'est donc par son caractère transversal que le « matériau » – importé des États-Unis – achève le processus de spécialisation de la chimie de l'état solide, en une chimie des surfaces et une chimie du solide (en volume).

La situation pourtant est plus complexe. Car, la chimie du solide se construit aussi sur une ambiguïté linguistique. Dans le rapport général de conjoncture de 1974 [RC CNRS, 1974] qui divise la chimie par tiers, l'expression « chimie du solide » désigne la chimie de tous les solides quels que soient leur composition chimique : métallique, inorganique, organique, polymère, hybride*, en volume mais aussi en surface.¹²⁷ La chimie du solide, que j'ai définie par rapport à une « communauté scientifique pertinente » (III.4.2.3), n'appartient alors qu'à la section 11 « chimie des matériaux solides » quand la chimie en compte sept. Au sein de la section 11, le rapport de conjoncture chimie [RC CNRS, 1974, chimie] distingue encore cinq domaines dont l'un s'appelle « chimie du solide ».¹²⁸ Dans son acception la plus étendue, l'expression « chimie du solide » englobe un tiers de la chimie tandis que dans son acception la plus restreinte elle en désigne le trente-cinquième ! La chimie du solide, la seule qui coïncide avec une communauté sociale, ne représente quant à elle qu'un dixième environ de la chimie totale. L'identité des trois expressions est trompeuse car chacune correspond à des

¹²⁶ L'émergence des surfaces et interfaces est issue d'une réorganisation des domaines traditionnels, qui est ensuite relayée par une dynamique propre. Durant les années 1950, la chimie de l'état solide s'intéressait simultanément aux phénomènes de volume et de surface. Au cours des années 1960, 1970, un certain nombre de chimistes de l'état solide (comme Bénard, Trambouze, Amiel) ont choisi de se spécialiser dans l'étude des surfaces. Ce faisant, ils ont migré vers et participé à la construction de ce domaine.

¹²⁷ Le rapport général de conjoncture pour l'année 1974 [RC CNRS, 1974] choisit un découpage différent de celui spécifique à la chimie [RC CNRS, 1974, chimie]. Selon le rapport général, la partition de la chimie est ternaire mais la frontière entre les deux premières parties a bougé : « Chimie des solides et de leurs surfaces », « Chimie des interactions », « Chimie moléculaire » [RC CNRS, 1974, p. 77-100]. L'interface fluctue, alternativement associée au volume ou aux interactions. Selon moi, le rapport général du CNRS a plus vocation à convaincre qu'à décrire une réalité sociale. Le rapprochement entre volume et surface serait donc plutôt rhétorique mais la question reste ouverte.

¹²⁸ Les cinq sous-parties de la section 11 sont : « physico-chimie des matériaux ; chimie du solide ; thermodynamique ; chimie métallurgique ; physique et chimie dans des conditions extrêmes » [RC CNRS, 1974, chimie, p. 5]. La « chimie du solide » correspond ici à son acception la plus restreinte (1/35^e de la chimie s'il y équitpartition !).

réalités sociales complètement différentes. Pour déjouer le piège des mots, il faut dédoubler l'expression. L'acception étendue renvoie à la « chimie des matériaux », vaste ensemble conceptuel sans frontières sociales, ni territoire chimique. Sans assises communautaires, elle n'en demeure pas moins d'une remarquable efficacité rhétorique à partir des années 1970 en France. L'acception restreinte pointe sans doute le cœur de la communauté scientifique pertinente. L'acception intermédiaire – celle qui justifie ce travail de thèse – désigne une communauté scientifique qui s'est construite à partir des années 1950 à la conjonction d'un réseau de chimie de l'état solide et de conditions historiques favorables. Son champ d'action se focalise sur le solide minéral et volumique à applications potentielles. L'acception intermédiaire, qui correspond à la réalité sociale, est invisible dès que l'on sort de la sphère scientifique (Université et industrie des matériaux) tandis que l'acception étendue irradie toute la société occidentale des années soixante-dix. La chimie du solide se construit sur cette antinomie irréductible, entre une visibilité rhétorique en société et une invisibilité du travail quotidien. Par la suite, et contrairement aux rapports institutionnels volages, je resterai fidèle à la chimie du solide dans son acception intermédiaire, sauf mention spéciale.

À partir des années soixante-dix, l'importance industrielle de la métallurgie décroît en valeur relative. Si les métaux et alliages représentaient 73% des matériaux d'ingénierie en 1940, pour atteindre un maximum à 82% vers 1960¹²⁹, ils ne représentent plus que 56% vers 1990. Cette perte d'hégémonie s'opère principalement à l'avantage des céramiques (11%), composites (12,5%) et polymères (20%), d'après les estimations de [Ashby, 1987] (cité dans [West & Harris, 1997]). La préférence accordée aux métaux après-guerre à cause de leur tenue mécanique – prestige de la chimie métallurgique en *Chaudronnerie* – s'inverse donc au profit des solides minéraux et des polymères. On parle alors d'« *advanced materials* » pour désigner des matériaux de haute technologie.¹³⁰ Alors que le V^e plan de développement économique et social (1966-1970) favorisait la métallurgie plus que la chimie minérale [MIN, 1966b], quinze ans plus tard, un rapport de l'OCDE [1980] insiste sur la nécessité pour les années 1980 d'un « remplacement progressif des métaux et des alliages par des céramiques, des matériaux composites et des polymères ». Placé au cœur de la « technologie des matériaux », cette substitution est encouragée d'abord pour s'affranchir des zones d'approvisionnement en minerais (raisons géostratégiques) et – dans un deuxième temps seulement – pour coupler une bonne tenue mécanique à de nouvelles propriétés physiques (innovation technologique) dans la fabrication de « matériaux composites » [OCDE, 1981].¹³¹ Dans le VII^e plan (1976-1980),

¹²⁹ Au début des années soixante, « l'IRSID dispose, en 1961, d'un budget de 26.205.000 N.F » (soit trente six millions d'euros 2006) et son « effectif total du personnel (ingénieurs et cadres, techniciens, employés) s'élevait à 592 au 1er janvier 1961 » [Le Progrès scientifique, 1961, n°2].

¹³⁰ « *The latter half of the 20th century has seen the evolution of materials science, technology and engineering, by the converging of advances in metallurgical knowledge with developments in various other streams of interdisciplinary activity, particularly from chemistry and physics, and involving semiconductors, superconductors, ceramics, glasses, polymers and rubbers, biomaterials and composites. The term 'advanced materials' has come into use, referring to products where progress has achieved novel, sometimes unique properties opening up new fields of technology, for example in the electronics industry, and the development of smart materials and products for biomedical applications.* » [West & Harris, 1997, p. 320].

¹³¹ « Il faut avant tout s'affranchir des métaux utilisés parce que leurs minerais [autre que fer et aluminium] sont de faible teneur et que leurs gisements sont dispersés géographiquement et les remplacer par des « céramiques (oxydes, nitrures ou carbures de métaux ou métalloïdes abondants tels que l'aluminium ou le silicium) ou de polymères (dérivés de ressources renouvelables provenant de la biomasse ou de matières organiques comme le charbon ou le pétrole). Les propriétés physiques intéressantes actuellement conférées aux métaux, grâce aux alliages, pourraient être renforcées ou remplacées par l'utilisation ingénieuse des structures physiquement hétérogènes des matériaux composites (constitués en général de substances non métalliques dispersées dans d'autres substances afin d'obtenir des configurations spéciales telles que les fibres) ou des cermets (obtenus par dispersion d'oxydes ou de carbures dans des matrices métalliques) ou encore des verres. » Le rapport dit

face à la « crise actuelle », le nouveau mot-clé est « maîtrise », de la croissance, de l'environnement, des nuisances, de l'énergie [RC CNRS, 1974, p. 21]. Les experts sacralisent l'interdisciplinarité, promue panacée occidentale. Le matériau répond aux exigences du moment comme moyen de maîtriser la matière et l'énergie. Les approches traditionnelles, organiques et minérales, sont de plus en plus souvent associées au sein des mêmes programmes coopératifs. En effet, comme c'est la fonction qui compte le plus, peu importe que le matériau soit thermoplastique ou céramique. Les résultats sont parfois plus multidisciplinaires qu'interdisciplinaires. En rassemblant au-delà des « communautés scientifiques pertinentes », la plupart des ATP matériaux s'apparentent parfois à de simples juxtapositions financières.¹³² Concept fourre-tout, le matériau n'est alors qu'un moyen pour récolter de l'argent. Ce faisant, il incarne le passage – dénoncé par certains – de recherches effectivement coopératives (RCP) à des recherches formellement coopératives (ATP et suivantes), moins efficaces mais plus visibles pour les décideurs.¹³³

III.4.3.3. Spécificité du matériau en chimie du solide

Du fait de la poussée des matériaux non métalliques à partir des années 1970 et du prestige international de la chimie du solide française, la chimie du solide est souvent présentée comme l'un des domaines les plus porteurs de la chimie.¹³⁴ Malgré la spécialisation dont elle est issue (III.4.2.4), elle s'inscrit dans la dynamique vague « matériaux ». Dans sa notice de 1979, Collongues – qui est considéré comme l'un des fondateurs de la chimie du solide – rattache son travail à la « chimie des matériaux ».¹³⁵

La création des départements scientifiques en 1976 ne ralentit par l'effort du CNRS pour encourager la science des matériaux. La direction générale, courroie de transmission du pouvoir politique, prône l'interdisciplinarité comme stratégie pour faire face à la crise économique. Le second choc pétrolier (1980) rend à nouveau cruciale la question énergétique sans évincer les matériaux. Les années quatre-vingt correspondent à la décennie « matériau »

s'inspirer d'un ouvrage anglo-saxon [Ashby, 1979] de prospective en science (et technologie) des matériaux [OCDE, 1981, p. 118].

¹³² Par exemple, l'ATP « relations entre structure et propriétés des espèces chimiques », d'un budget de l'ordre du million de francs en 1974 (soit sept cent mille euros 2006), associe la « chimie des matériaux solides » et la « chimie moléculaire et macromoléculaire ». Les sujets ne présentent pas de point de recouvrement évident : l'ATP oriente les premiers vers des questions de conductivité ionique, de stabilité thermodynamique de solides minéraux afin de corrélérer l'arrangement microscopique aux propriétés macroscopiques tandis qu'elle lance les seconds vers des problèmes d'interaction de ligands organométalliques avec des matrices biologiques ou métalliques [Lettre bleue, 1974, juillet].

¹³³ « Les premières actions transversales aux laboratoires ont été proposées par la section chimie physique en 1962, sur l'initiative du professeur Pacault. Les [RCP] avaient pour vocation "*de constituer pendant une durée déterminée, un laboratoire sans mur, délocalisé qui permette de travailler ensemble sur un sujet déterminé. Par la suite, il y a eu d'autres formules toutes administrées et formalisées ATP, GS, GDR... où on se réunissait mais où on ne travaillait pas*" (citant son entretien avec Adolphe Pacault) [Lanciano-Morandat, 1999, p. 67].

¹³⁴ Par exemple, en 1974, les rapports d'activité et de conjecture de la chimie du CNRS placent systématiquement le domaine de la chimie du solide en premier [RA CNRS, 1974, p. 107 ; RC CNRS, 1974, p. 10, 77].

¹³⁵ Même si l'emploi de l'expression participe d'une stratégie de démarcation vis-à-vis de la chimie du solide (qui colle désormais trop au nom de son rival Hagenmuller), il est tout à fait symptomatique que Collongues l'emploie à la fin des années 1970. Vingt ans plus tard, lorsque Hagenmuller rédige une ultime notice de ses titres et travaux, il indique comme spécialité : « Physico-chimie du Solide, Science des Matériaux » [Hagenmuller, 1997].

au niveau du pouvoir politique.¹³⁶ En 1980, un vaste programme « Science des matériaux » est mis au point par le CNRS et soutenu par la DGRST [RA CNRS, 1980]. Il vise à continuer les ouvertures interdisciplinaires en faisant collaborer physiciens, chimistes et mécaniciens autour du « concept moteur [...] la relation structure-propriétés » [RA CNRS, 1982, p. 53]. Quatre thèmes principaux ont été choisis : plasticité des matériaux, physico-chimie des surfaces et interfaces, milieux aléatoires macroscopiques, matériaux à propriétés physiques et chimiques particulières. À cheval sur trois départements scientifiques – physique, chimie et sciences de l'ingénieur –, il mobilise les ATP mais aussi les nouveaux moyens d'incitation dont s'est doté le CNRS en 1976 : les Groupements d'études coopératives (GRECO) et les Groupements d'intérêt scientifique (GIS), ces derniers associant directement des industriels aux universitaires. Deux ans, plus tard, au printemps 1982, la direction générale du CNRS complète le programme en lançant le Programme interdisciplinaire de recherche sur les matériaux ou PIRMAT (VI.3.3.2). Rapidement autonome vis-à-vis des trois départements, le PIRMAT devient une « agence d'objectifs » créant ses propres appels d'offre pendant douze ans (1982-1994).¹³⁷ Une telle longévité indique une réelle volonté des politiques scientifiques successives. En juillet 1982, la loi d'orientation de la recherche de la nouvelle majorité pousse à la « restauration du dialogue entre la science et la société », [MIN, 1982, p. 4, et annexe : p. 21-44]. Ce faisant, elle conforte le paradigme matériaux, emblématique d'une science qui innove pour répondre aux besoins de la société.

Si le CNRS soutient les matériaux, quel rôle est dévolu à la chimie ? En mai 1982, la Société chimique de France organise un « Colloque national science des matériaux ». Pour le département de la chimie du CNRS, les matériaux constituent encore en 1984 l'un des quatre thèmes émergents de la chimie (avec l'interface chimie-biologie, la réactivité et l'instrumentation scientifique) [RC CNRS, 1984, p. 25]. C'est que le nouveau directeur scientifique, Michel Fayard (1984-1990), camarade de Collongues en *Chaudronnerie*, a fait des matériaux l'une des priorités de son mandat. Très actif, il multiplie les directions de recherche.¹³⁸ Succédant à Fayard, Paul Rigny (1990-1996), administrateur du CEA, poursuit « l'effort sur les matériaux et sur la chimie du solide » en mettant l'accent sur la réactivité chimique et l'approche moléculaire. En 1996, Jean-Claude Bernier, ancien élève de Michel, devient directeur scientifique de la chimie.

Malgré ses nombreux efforts vers les matériaux, l'impact du département chimie sur la dynamique générale n'est pas claire. À partir de 1989, les rapports de conjoncture du CNRS abandonnent la vision disciplinaire pour la remplacer par une « réflexion autour de thèmes interdisciplinaires ». La « science et génie des matériaux » est l'un des vingt-deux groupes, réunissant de multiples sections disciplinaires. La présentation du groupe donne l'occasion de rappeler que le « concept de matériau indissociable de la notion de technique et d'application

¹³⁶ « Le "fait matériau" est actuellement bien pris en compte au plus haut niveau car, après avoir mis l'accent au début des années 70 sur les technologies de l'information, puis au début des années 80 sur les technologies du vivant, les pouvoirs publics de la plupart des pays industrialisés mettent aujourd'hui le développement des matériaux parmi leurs toutes premières priorités. » [RC CNRS, 1989, p. 151].

¹³⁷ Créé avec un budget indépendant, le PIRMAT est ensuite piloté par le département de chimie (1985-1990), puis par la Direction de la programmation et des prévisions budgétaires (DPPB), organe de la direction générale [Lanciano-Morandat, 1999, p. 89].

¹³⁸ En 1990, le PIRMAT soutient fortement les « matériaux à vocation aérospatiale » en faisant collaborer des chercheurs universitaires avec les organismes d'état à vocation appliquée : DRET, CNES, ONERA, GDF... D'autres domaines sont en cours de développement : « nouveaux semi-conducteurs, des matériaux interagissant avec les micro-ondes (furtivité), de multimatériaux amortissants acoustiques, de composites à matrice céramique, de verres pour l'optique non linéaire (fibres actives ou passives)... » tandis que des thèmes nouveaux apparaissent : « calcul numérique intensif, comportement sous choc, géomatériaux, les interfaces dans les composites, les procédés faisant appel aux plasmas froids, l'effet de gravité. » [RA CNRS, 1990, p28].

est un *concept charnière* entre le monde de la connaissance et le monde productif, entre la recherche et l'industrie » [RC CNRS, 1989, p. 151]. En 1992, quatorze sections du CNRS – dont la section 19 « élaboration, caractérisation et modélisation du solide » – sont regroupées sous l'appellation générique : « matériaux spécifiques pour des fonctions nouvelles ou complexes » [RC CNRS, 1992]. Le discours que l'Université française tient sur elle-même a donc été réorganisé autour de ce concept, étranger à la culture disciplinaire parce que transversal et finalisé. En particulier cette acculturation brouille l'organisation de la chimie du solide et efface (au moins dans les rapports institutionnels) l'image de la communauté scientifique pertinente. Le matériau, concept charnière, appelle une présentation par « fonctions », c'est-à-dire selon une logique d'usagers. Le renversement de la logique de conception – on passe d'une synthèse « élémentaire » de la matière à un « matériau sur mesure » – conduit le chimiste à inverser la démarche de son travail : la fonction (jadis conséquence) devient la cause du travail (ce qui induit une certaine structure). La chimie du solide minéral est désormais introuvable dans les rapports d'activité, désormais noyée dans la constellation matériaux.

En résumé, si l'attention portée au solide utile – le matériau – induit partiellement et dynamise complètement la chimie du solide, ouverte sur le monde industriel, l'institutionnalisation du concept de matériaux vient néanmoins troubler la visibilité de la communauté des solidistes. Au milieu des années 1970, au moment où la chimie du solide achève son institutionnalisation et stabilise sa « matrice disciplinaire » – composés minéraux volumiques –, son image publique se dilue au contact de la science des matériaux. La chimie des matériaux constitue alors un vaste espace conceptuel qui, en France, marque les consciences mais pèse faiblement sur l'organisation sociale de la recherche en chimie. Polymères, surfaces, poudres céramiques ne sont pas étudiés par les mêmes communautés scientifiques alors que la société, préoccupée de solutions utiles, les déclarent interchangeable. La chimie du solide pour sa part conserve une structure sociale forte, hiérarchisée autour de quelques mandarins. En revanche, dans les années 1980, « l'esprit matériaux » investit la chimie du solide par au moins deux voies : le renversement causal synthèse-applications et l'étude structurale à toutes les échelles. Présents dès 1977, ces deux éléments vont s'amplifier par la suite. La multiplication des échelles structurales s'accompagne d'un retour vers la chimie des interfaces, qui avait été abandonnée dans les années 1960 au profit des seuls cristaux.

Conclusion

Le chapitre III devait suivre l'émergence de la chimie du solide entre 1950 et 1980. La chimie du solide m'est d'abord apparue sous la forme d'une parole. Chaque témoignage déclinait sur un mode personnel un archétype commun. C'est ce récit commun, simple et caricatural, que j'ai fixé sous la forme d'une légende. À la manière d'un récit de chevalerie, il met en scène l'empire de la chimie minérale où deux précurseurs – Chaudron et Chrétien – s'affrontent à la tête de baronnies rivales – la *Chaudronnerie* et la *Chrétienté* –. Chaque ancêtre reconnaît un héritier présomptif, qui sera le champion de la génération suivante : Collongues et Hagemmuller. Assez visionnaires pour s'ouvrir aux influences autres – la cristallographie, la physique, l'industrie – et assez charismatiques pour forger deux écoles rivales, ces deux fondateurs luttent pour la suprématie sociale et cognitive sur un domaine émergent – la chimie du solide – qu'ils transforment en une discipline universitaire florissante.

À ce récit des origines, j'ai opposé un autre récit qui mettait en relief moins des personnages hors du commun que des groupes sociaux en évolution. En France, vers 1950, la chimie de l'état solide est structurée comme un réseau ouvert sur l'extérieur et qui s'appuie sur une base de chimie minérale. Héritière d'une tradition mandarinale, elle s'organise autour de quatre familles scientifiques, dominées par des mandarins (Lebeau, Chaudron, Trombe, Chrétien) et s'inscrit dans un découpage épistémique discriminé par l'élément chimique. Formé de laboratoires en interaction, le réseau est marqué par une forte hétérogénéité des savoirs et savoir-faire, et une divergence des objectifs. Centré sur la réactivité et les défauts, l'état solide est pensé comme un continuum qui associe métaux, graphite et oxydes métalliques, phénomènes de surface et en volume. Au cours des années 1960, avec l'inflation de la recherche publique, l'afflux de nombreux étudiants et le charisme de nouveaux *outsiders*, le réseau évolue, s'étoffe et se focalise de plus en plus sur le seul solide minéral et volumique. Les acteurs se réunissent de plus en plus souvent au niveau national, convergent vers des méthodes communes et publient dans des journaux spécialisés internationaux. Au cours des années soixante-dix, les jeunes professeurs de la génération 1950 à leur tour sont devenus des mandarins. Ils profitent de leur pouvoir pour renverser les institutions traditionnelles – au CNRS, la section chimie minérale, que l'on trouve désuète, est remplacée par celle de chimie des matériaux solides – et pour normaliser les pratiques autour de règles communes. La matrice disciplinaire fait consensus : le solide minéral en volume doit être traité par la double relation, structure-propriétés, propriétés-applications. À une vision continue de l'état solide s'appuyant sur un réseau souple et des méthodes variées, les acteurs ont substitué une matrice disciplinaire normée, structurant une communauté scientifique autour d'un nouvel objet épistémique, « le solide », qui malgré l'aspect générique de son nom renvoie essentiellement aux solides ioniques, en volume.

Le récit oral avait tendance à insister sur l'aspect local (laboratoire) et national (France). En élargissant le point de vue, il appert que le phénomène national, malgré sa spécificité, fait écho à d'amples transformations internationales. Le réseau européen de chimie de l'état solide s'est intégré à une dynamique associant *Solid State Chemistry* et *Solid State Physics*. Physique et chimie du solide occidentales sont influencées par les *Materials science and engineering* en provenance des États-Unis. Dès les années 1960, le concept « matériaux » par ses finalités appliquées envahit les milieux politiques et économiques. À partir de 1980, alors que la chimie du solide française a stabilisé sa matrice disciplinaire et sa communauté scientifique, en partie grâce aux ressorts stratégiques des matériaux, son individualité est brouillée par une vaste nébuleuse « science des matériaux », qui sans attache communautaire

forte (du moins en Europe) n'en possède pas moins une puissante rhétorique médiatique, politique et économique.

Après ce volet descriptif, il est temps de proposer une interprétation de l'émergence de la chimie du solide, c'est-à-dire le passage d'un réseau ouvert et multiforme à une communauté normée par une matrice disciplinaire et bornée par des frontières.

Puisque Chaudron énonce explicitement dès 1948 ce qui deviendra le dogme communautaire trente ans plus tard, puisque les thèses de Michel ou de Bénard mettent en application ses méthodes dès les années 1930, il semble que les aspects épistémologiques (méthodes, pratiques) de la science ne comptent guère pour définir une discipline scientifique. Certains témoignages veulent convaincre du passage d'une chimie minérale « vieillotte » à une chimie du solide « moderne ». La victoire des modernes sur les anciens satisfait surtout les « modernes ». Que s'est-il passé durant ces trois décennies 1950-1980, le temps d'une (courte) carrière universitaire ? D'autres témoignages suggèrent que c'est l'établissement de la double relation appliquée aux solides minéraux qui a permis l'émergence de la chimie du solide. Je leur concède deux évolutions majeures qui vont dans ce sens-là. Premièrement, un glissement qualitatif s'est opéré. Avant 1950 la relation structure-propriétés est souvent conçue comme une méthode de contrôle a posteriori, qui suit la synthèse pour vérifier quel composé a été fabriqué (propriété→structure). Au cours des années 1970, la relation tend à inverser sa polarisation : on la conçoit désormais (avec une bonne dose de croyance) comme une méthode de synthèse a priori (structure→propriété). En d'autres termes, elle oriente la synthèse du chimiste intéressé par une propriété physique et lui suggère de substituer tel élément à tel autre – plus électronégatif ou plus volumineux, etc. – pour obtenir telle propriété. Toutefois, l'aspect prédictif reste toujours très qualitatif et incertain. Pour mettre en évidence ce glissement qualitatif, il a fallu délaissé le discours, qui, à trente ans d'intervalle, utilise les mêmes mots pour désigner des réalités différentes, et observer plus attentivement les pratiques de laboratoire.

Deuxièmement, une évolution quantitative s'est opérée. Un à un les laboratoires de chimie minérale sont venus se ranger sous la bannière triomphante de la structure cristalline : ils étaient seulement deux durant les années trente (Chaudron, Trombe) et sont désormais une quarantaine à la fin des années soixante-dix. Alors, il n'y eut plus d'opposition farouche à la nouvelle évidence, l'équivalence entre une structure matérielle et les propriétés phénoménologiques qu'elle porte, bientôt inscrite au fronton de la communauté. Il s'agit selon moi d'un double glissement et non d'une rupture entre deux chimies qui seraient incommensurables – l'ancienne, descriptive, et la moderne, prédictive –. Mais, deux évolutions ne suffisent pas à expliquer la construction d'une discipline universitaire.

Si le critère déterminant n'est pas épistémologique, il est probablement social. Dans cette histoire guerrière, la *Chaudronnerie*, principal soutien de la chimie de l'état solide en France, perd la bataille de la chimie du solide face à un rejeton de la *Chrétienté* : l'école *hagenmullérienne*. En effet, à des degrés divers, Chaudron, Bénard, Collongues se sont efforcés de défendre socialement la continuité épistémique de l'état solide – du métal au composé ionique, de la surface au volume –. L'organisation sociale du travail qu'ils ont préconisée a été vaincue. Au contraire, c'est une chimie centrée sur le solide minéral, cristallin et volumique qui s'impose vers 1975. Une telle évolution pose plusieurs questions. Pourquoi, justement au moment où la science occidentale – France comprise – valorise l'« interdisciplinarité » et dénigre le cloisonnement disciplinaire, est-ce la solution la plus disciplinaire des deux qui s'impose ? Est-ce le « matériau » lui-même qui a provoqué une coupure entre le volume, les « surfaces » et les « interfaces » ? Pour être interdisciplinaire, fallait-il d'abord être disciplinaire ? Si la chimie de l'état solide allait au bout de sa logique de continuité épistémologique, elle aurait pu conduire à un regroupement des polymères, des

matériaux biologiques, organiques, voire la cristallographie et la physique des solides, c'est-à-dire un ensemble aussi vaste que la chimie elle-même, probablement trop vaste. Une communauté donnée doit-elle, pour exister, avoir une taille appropriée à l'ensemble universitaire qui le reçoit ? Une communauté représente-t-elle 1%, 2%, 5% de la communauté nationale ? D'autre part, malgré la rhétorique interdisciplinaire, la science européenne semble poursuivre dans son organisation disciplinaire (option suggérée par l'OCDE en 1972). En France, le CNRS s'est cloisonné en départements scientifiques à partir de 1966 et, de leur côté, les minéralistes français ont refusé l'option institut des matériaux à l'américaine en 1969. La chimie du solide, en se concentrant autour du seul minéral, s'inscrit dans une perspective disciplinaire et ne fait qu'adapter la chimie minérale traditionnelle. Sa taille correspond à peu près à une section du CNRS. Les sections voisines, les groupes de pression connexes (métallurgistes, catalyse, physiciens) avaient eux-aussi intérêt à un éclatement de la chimie de l'état solide pour en récupérer des morceaux. La chimie du solide se montrait moins gourmande que la chimie de l'état solide et offrait une taille intermédiaire qui ne menaçait pas trop ses voisines. Elle restait invisible de loin, recouverte par la vaste nébuleuse rhétorique, science des matériaux. Une autre hypothèse est possible : la chimie de l'état solide était trop liée à la chimie minérale pour vouloir s'en extirper et obtenir une indépendance. Les mandarins de la chimie de l'état solide n'ont jamais renoncé à la chimie minérale dans laquelle ils avaient été formés. Il a fallu l'éclatement de la chimie minérale entre chimie du solide, chimie de coordination et chimie des surfaces pour débloquent la situation.

Ces questions restées sans réponse montrent à quel point les territoires scientifiques sont structurés par les frontières, tantôt mouvantes, tantôt prises dans l'inertie institutionnelle ou idéologique. Elles se déploient de l'éprouvette aux sphères politique, économique, et culturelle. Les acteurs se définissent par leur formation initiale et leur travail quotidien. Quand on interroge l'un des membres du laboratoire, il se situe dans une généalogie (élève de...) et comme membre d'une communauté (*solidiste* français). Quand on répertorie les laboratoires mentionnés, ils s'agencent en une communauté de rivaux et d'amis (III.3.2.4). Cette communauté, superposée à d'autres communautés de chimistes (organiciens, polyméristes), forme le réseau de la chimie des matériaux, qui couvre un tiers de la chimie universitaire. À la chimie des matériaux, les centres de pouvoir demandent de synthétiser du nouveau utile. Ce réseau interagit avec d'autres réseaux impliquant physiciens des solides, spectroscopistes, métallurgistes. Quand on quitte l'Université, on aperçoit les industriels privés ou publics, la sphère politique, le monde de la finance. À ce niveau, on parle de génie et de science des matériaux, dont les réalisations sont bien visibles dans la société.

Ce qui surprend le plus, c'est que les frontières sont surtout présentes dans la tête des scientifiques. Chaque acteur a une vision propre du monde qu'il habite. Chaque cartographie du territoire dépend du vécu de l'acteur, de son métier, de sa position sociale, de l'avancement de sa carrière, des circonstances dans lesquelles il parle, écrit ou pense. Ceci nous ramène à la quête des origines. Pourquoi en se lançant dans la quête d'une date fondatrice ne découvre-t-on rien de satisfaisant ? Pourquoi en voulant repérer un territoire dessine-t-on inmanquablement un espace aux contours flous, aux limites instables, et aux acteurs en mouvements ? Pourquoi la chimie du solide échappe-t-elle à toute définition stabilisée ?

Longtemps je me suis étonné de voir combien l'expression « chimie du solide » est absente des textes (institutionnels, politiques, scientifiques), combien elle sonne creux aux oreilles des profanes, combien elle est invisible dans la société. Sa présence se fait sentir non pas dans les matériaux qu'elle fabrique – ils sont infiniment peu nombreux à atteindre le consommateur –, non pas dans les études qu'elle publie – elles sont noyées dans un flux d'information planétaire –, mais dans la parole communautaire. La chimie du solide vit par ceux qui y jouent, par ceux qui en parlent, par ceux qui y croient. Qu'est-ce qu'une discipline

scientifique sinon une communauté qui a réussi à se convaincre qu'elle existe (par le mythe des origines), et qui ensuite convainc le monde qui l'entoure ? Un territoire sans limite, une durée sans origine autres que ceux que la voix d'une communauté donne à entendre, qui se répercute, s'amplifie et se déforme à chaque réflexion sur la paillasse des laboratoires, le tableau des amphithéâtres et la coupole des congrès. Devenir une communauté ne serait alors pas simplement s'inventer une histoire commune pour se convaincre d'une identité commune ?

Chapitre IV.

Les laboratoires-types
en chimie du solide : approches locales.

Chapitre IV. Les laboratoires-types en chimie du solide : approches locales. 207

<i>Introduction</i>	210
<i>IV.1. Le laboratoire de la faculté de pharmacie ou le type « élémentaire » (1950-1984).</i>	212
IV.1.1. Une logique « élémentaire » vers les chalcogénures métalliques.....	212
IV.1.2. De la synthèse chimique aux diagrammes de phase : une option originale en chimie du solide ?.....	216
<i>IV.2. Le Laboratoire des terres rares ou le type « élémentaire-instrumental » (1950-1992)</i> 220
IV.2.1. Similarités chimiques, réactivité et purification « élémentaire » (1950-1964)..	221
IV.2.2. De la propriété aux applications : un « laboratoire propre » dépendant de l'industrie (1961-1970) ?.....	224
IV.2.2.1. Des trois visages de la propriété physique.....	224
IV.2.2.2. Implications en recherche appliquée.....	226
IV.2.3. Mathématisation et spectroscopie en chimie du solide : le cas du groupe Caro (1955-1992).....	228
IV.2.3.1. Tribulations d'un jeune Français au Far West et ses conséquences hexagonales (1965-1967).....	229
IV.2.3.2. Chimie mathématique et recherche fondamentale.....	231
IV.2.3.3. Réorientations des années 1980 entre organique et biologique.....	235
<i>IV.3. Du CECM au Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide ou le type « instrumental-historique » (1954-1980)</i>	237
IV.3.1. Des polycristaux* à la cristallogenèse, entre réfractaires et fours à haute température (1954-1972).....	237
IV.3.1.1. Premier cycle des réfractaires (1954-1962) : formation d'une école de recherche.....	237
IV.3.1.2. Deuxième cycle des réfractaires (1962-1973).....	241
IV.3.1.3. La logique « synthèse-instrumentale », des fours à la cristallogenèse.....	243
IV.3.2. De l'idée à la matière : incarnation de la chimie appliquée de l'état solide (1965-1974).....	249
IV.3.2.1. Chimie de l'état solide au milieu des années soixante : modernité ou propagande ?.....	249
IV.3.2.2. Création du Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide (1971-1974).....	251
IV.3.3. Une recherche fondamentale sur fond de crise énergétique : les « superconducteurs ioniques ».....	252
IV.3.3.1. Approche structurale des aluminates de sodium (1961-1965).....	253
IV.3.3.2. Cycle des superconducteurs ioniques (1970-1980) : entre financements industriels et logiques instrumentales.....	254
IV.3.3.3. Réflexions sur le « programme de recherche » de Collongues à la fin des années soixante-dix.....	257
<i>Interlude où la cristallogenèse entre en chimie du solide</i>	261
<i>IV.4. Du contournement à la clôture d'un territoire ou le type « systématique-élémentaire » de l'école bordelaise (1956-1986)</i>	265
IV.4.1. De Rennes à Bordeaux : une stratégie « élémentaire », multidisciplinaire et internationale (1956-1976).....	265

IV.4.1.1. Les débuts en chimie minérale à Rennes : le mythe de la « rupture » avec la <i>Chrétienté</i>	265
IV.4.1.2. Le programme de recherche « tous azimuts élémentaires » (1956-1963) ..	267
IV.4.1.3. Le congrès de Bordeaux de 1964 : fondation d'une discipline ou vitrine d'un laboratoire ?	271
IV.4.1.4. Corpus méthodologique : de la cristallographie aux mesures physiques, l'exemple des bronzes de vanadium (1963-1975).....	274
IV.4.2. L'« âge d'or » du Laboratoire de chimie du solide et ses prétentions disciplinaires (1969-1986).....	279
IV.4.2.1. La puissance institutionnelle au service de l'« école de recherche » <i>hagenmullerienne</i>	279
IV.4.2.2. Une science dépendante de la société et ouverte sur le monde.....	282
IV.4.2.3. Stratégie hexagonale : essaimer ses élèves et façonner une discipline	286
IV.4.3. Entre bronze minéral et chair organique, Paul Hagenmuller : un « personnage » extra-ordinaire	289
<i>Conclusions</i>	291
1°) Diversité des « programmes de recherche » et diffraction des rayons X.....	291
2°) Du laboratoire au territoire national : victoire des outsiders de province sur la tradition parisienne ?	294
3°) Émergence d'une communauté : rompre l'équilibre des altérités locales pour créer une identité globale	304

Introduction

Avant 1950, l'état solide offre une image sociale fragmentée en sciences expérimentales. Pour la chimie, aucune sous-discipline ne traite exclusivement de solides et les solides ne sont pas tous étudiés par la même sous-discipline (II.1.1). Saisir l'objet « solide » d'alors revient à inventorier les différents groupes de chimistes qui s'y intéressent. La coupe sociale qui en résulte montre la superposition de strates, de la famille scientifique (cellule de base du système mandarinal) au réseau européen de chimie de l'état solide en passant par des groupes thématiques aux logiques instrumentales (II.1.2). En une trentaine d'années, une dynamique collective, soutenue par les conditions favorables des Trente Glorieuses et marquée par quelques personnages hauts en couleur, transforme la stratification initiale en une communauté scientifique puissante, ayant normalisé ses méthodes en une matrice disciplinaire cohérente et s'étant institutionnalisée à l'Université et à la Société chimique de France (III.4). L'analyse multiple – épistémologique, sociologique, historique – qui déroulait le fil de l'histoire avait été construite comme réponse à un récit légendaire, recueilli à travers le témoignage des acteurs. C'était finalement de sa simplicité mythologique que le récit légendaire tirait sa « fonction créatrice » [Girardet, 1986, p. 13]. En réunissant de multiples individus venus d'horizons (familiaux, régionaux, disciplinaires) différents, il servait de force motrice pour la formation d'une communauté scientifique. Simultanément, il devenait la pierre d'angle d'une construction identitaire de la chimie du solide.

La perspective se voulait résolument plongeante pour embrasser du regard l'acteur principal – la « communauté scientifique » – dans les multiples circonlocutions de son histoire. Perché sur les archives institutionnelles, politiques et scientifiques, le point de vue s'appliquait consciencieusement à aller de haut en bas. L'individu, que le récit légendaire avait tant voulu glorifier (III.1.1), était devenu un point minuscule au milieu de vastes mécanismes sociaux et culturels. Ici, la perspective s'inverse, et désormais le récit va se rapprocher des êtres de chair et de sang, sans pourtant verser dans une suite de portraits ou dans la prosopographie. L'unité de lieu sera le « laboratoire », envisagé comme acteur collectif mais local, dans lequel les êtres humains joueront un rôle important. Ce choix surestime probablement le rôle des chefs, ce qui pose un problème méthodologique non résolu. Il permet – et c'est là sans doute son principal intérêt – de mettre en évidence des comportements singuliers et des croyances locales, qui tout autant que les phénomènes généraux, travaillent à l'édification de la chimie du solide française. À la synthèse institutionnelle ouvrant une perspective plongeante ou « *downstream* », répond une analyse locale de modes de pensée et d'action émergents suivant une direction montante ou « *upstream* » [Gyerin, 1999]. Il s'agit de montrer que, malgré une uniformisation des pratiques scientifiques au cours de la période – l'établissement de la « matrice disciplinaire » (III.2.2) –, les laboratoires disposent d'une certaine autonomie pour développer leur propre programme de recherche. Ils développent certaines spécificités techno-scientifiques, adoptent des stratégies sociales distinctes, qui façonnent plus ou moins l'œuvre générale – suivant qu'ils gagnent ou qu'ils perdent – mais aussi les représentations individuelles quant à l'histoire commune ou la description du monde. À une identité globale répondent des altérités locales.

En se concentrant sur les singularités, le récit ne peut prétendre à l'exhaustivité – ni au sein d'un laboratoire, ni dans le réseau des laboratoires – mais tente de mettre en place une sorte de typologie de laboratoires en décrivant des exemples illustrant des options qu'on peut considérer comme typiques. Je prends « type » dans le double sens de « modèle » – celui qui constitue le paradigme commun – et d'« empreinte » – celui qui marque l'espace social –.

Pour l’empreinte sociale, l’historien est tributaire des témoignages recueillis dans la communauté et de résultats quantitatifs, qu’il peut construire pour tenter de confirmer ou d’infirmer des opinions. Il se place plutôt ici sur le plan d’une intersubjectivité.¹ Pour le modèle, il est influencé par les catégories de la communauté elle-même mais aussi par les interrogations des philosophes et sociologues des sciences, qui privilégient tantôt les théories, tantôt les techniques.

Le choix des laboratoires-types pose un problème crucial. En l’absence d’inventaire systématique, qui choisir et pourquoi ? Trois critères ont motivé leur choix. Le premier – qui justifie ce chapitre – est l’originalité des programmes de recherche : chacun doit se distinguer des autres par des choix méthodologiques et/ou instrumentaux différents. C’est en cela qu’il sera typique. À ce titre nombreux sont les postulants. Le second critère tient à la durée : l’existence laboratoire doit couvrir la durée de la construction communautaire (1950-1980). Cette condition restreint le choix à la quinzaine de laboratoires déjà repérables en 1950 (A.III.1). La rareté des archives de laboratoires avant 1966 diminue encore leur nombre. Comme j’ai travaillé avec les archives du CNRS, je dispose de plus de ressources pour les entités propres du CNRS. Deux des quatre laboratoires envisagés sont rattachés au CNRS avant 1950 : le Centre d’étude de chimie métallurgique (CECM) et le Laboratoire des terres rares (LTR). Par rapport à eux, le Laboratoire de chimie minérale (LCM) de la faculté de pharmacie à Paris s’est imposé parce qu’il était porté par la troisième grande famille de minéralistes étudiant les solides vers 1950 (II.1). Ces trois laboratoires répondent au troisième critère : choisir des entités dont on parle dans la communauté (puisque je m’appuie beaucoup ici sur les témoignages oraux). En matière de domination sociale, le Laboratoire de chimie du solide (LCS) est incontournable car chaque témoignage le cite comme le laboratoire de référence en France. Je l’ai donc choisi même si sa création est postérieure à 1950.

Le LCM, qui se construit par focalisation sur un élément chimique, incarnera le type *élémentaire* (IV.1). Le LTR se focalise quant à lui sur un élément chimique qui induit une caractérisation particulière et subséquentement le développement de techniques particulières : ce sera le type *élémentaire-instrumental* (IV.2). L’équipe Collongues au CECM (puis au Laboratoire de chimie appliquée de l’état solide) poursuit une logique essentiellement instrumentale qui tend à réutiliser au maximum les savoir-faire antérieurs pour organiser des cycles de recherche successifs, type que j’appellerai *instrumental-historique* (IV.3). Ces trois options de recherche, à la conjonction de la chimie de l’état solide et des hautes températures, correspondent aux choix des notables parisiens tournés vers les solides avant 1950 ou de leurs épigones. Le quatrième laboratoire est le seul à jouer le rôle d’*outsider* à la fin des années cinquante. Cette position justifie peut-être la stratégie de contournement qu’il adopte au départ, et systématique ensuite, qui lui fait étudier l’ensemble des solides du champ disciplinaire. Le LCS représente le type *systématique élémentaire* (IV.4).

¹ L’image de la communauté que donne chaque témoignage est localement *déformée* au voisinage de son propre laboratoire, chacun ayant tendance à insister sur ce qu’il a vu avec sa position et ses perspectives. L’idée de déformation sera reprise plus tard parce qu’elle présuppose l’idée d’une référence fiable (la réalité ?) par rapport à laquelle les points de vue subjectifs seraient déformés. Selon moi, une telle référence est loin d’être acquise en histoire. D’autre part, on peut penser qu’une confrontation des points de vue et des récompenses distribuées peut aboutir à repérer quelques laboratoires, plus marquants. L’empreinte sociale de chacun est ainsi posée comme évaluation intersubjective.

IV.1. Le laboratoire de la faculté de pharmacie ou le type « élémentaire » (1950-1984)

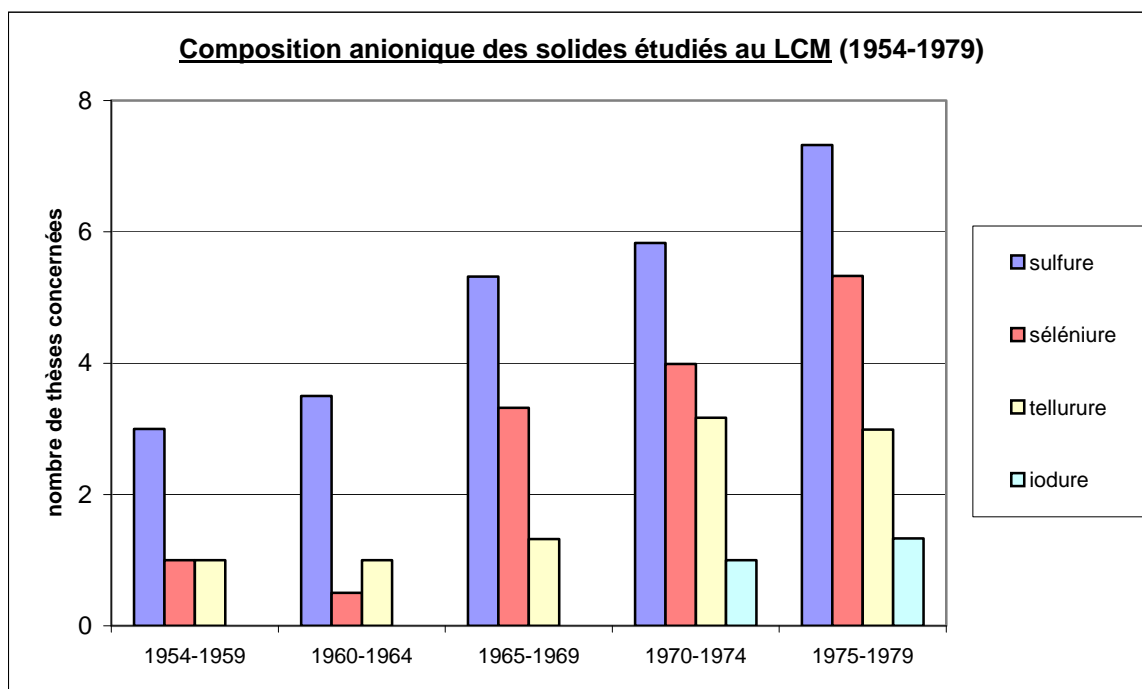
IV.1.1. Une logique « élémentaire » vers les chalcogénures métalliques

À la faculté de pharmacie, Marius Picon dirige le Laboratoire de chimie minérale (1946-1966). Héritier de Lebeau, il l'a orienté vers la chimie des hautes températures mais il se distingue par le choix des « sulfures solides » (III.2.1.2). Il encourage la carrière de l'un de ses premiers thésards : Jean Flahaut. Flahaut réalise une thèse d'État sur les sulfures d'aluminium (1946-1951) puis Picon lui confie rapidement et officieusement l'encadrement d'une première thèse sur les « sulfures de cérium » (celle d'E. Attal, 1954) tout en restant gardien de « l'autorité » académique et directeur officiel de thèse [Flahaut, 1982, p. 8]. Picon encourage ses étudiants à synthétiser de nouveaux composés. Au début, les composés binaires associent l'élément soufre en tant qu'anion (électronégatif) et un élément métallique comme cation (électropositif). Par la suite, le « père » Picon varie les plaisirs en travaillant sur le sélénium et le tellure. Ses préoccupations sont essentiellement chimiques.² De manière quasi systématique, le titre des thèses du laboratoire prend la forme « Contribution à l'étude d'un » composé dont la composition chimique est précisée. L'emploi répétitif de cette formulation permet de suivre l'évolution *élémentaire* des composés étudiés au sein du laboratoire. Suivant les conseils du maître, Flahaut et ses étudiants concentrent quasi-exclusivement leurs efforts autour des « chalcogénures », c'est-à-dire les sulfures (S), séléniures (Se) et tellurures (Te).³ Soufre, sélénium et tellure sont trois éléments de la colonne 16 du tableau périodique, situés sous l'oxygène. Chaque anion définit une catégorie de solide. Durant vingt-cinq ans, de 1954 à 1979, les thèses concernent seulement quatre catégories de solides : sulfure, séléniure, tellurure, iodure -. En analysant le titre des thèses [Flahaut, 1982], on peut tracer l'évolution « élémentaire » suivante, par quinquennat.⁴

² « S'orienter vers la chimie des hautes températures nous conduisait à des préparations multiples de composés nouveaux : Picon nous orienta vers les sulfures, les séléniures et les tellures. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 1].

³ Le terme générique « chalcogénure » n'est pas utilisé dans l'énoncé des thèses du laboratoire avant 1970. Au cours des années 1960, lorsque les trois types de solide sont simultanément étudiés au sein d'une thèse, les trois mots « sulfure », « séléniure » et « tellurure » sont explicitement présents dans l'énoncé de la thèse. Ce n'est qu'après 1970, que l'expression générique prend place au laboratoire.

⁴ Le titre des thèses est extrait de la notice de Flahaut [1982] qui fait état de 56 thèses soutenues dans le laboratoire à partir de la première dont lui-même s'est occupé (1954-1981). J'ai choisi de découper le temps sous forme de quinquennats pour moyenniser et obtenir ainsi des tendances plus visibles. Si n composés dans le titre, chacun compte pour (1/n) pour donner à chaque thèse un poids statistique équivalent.

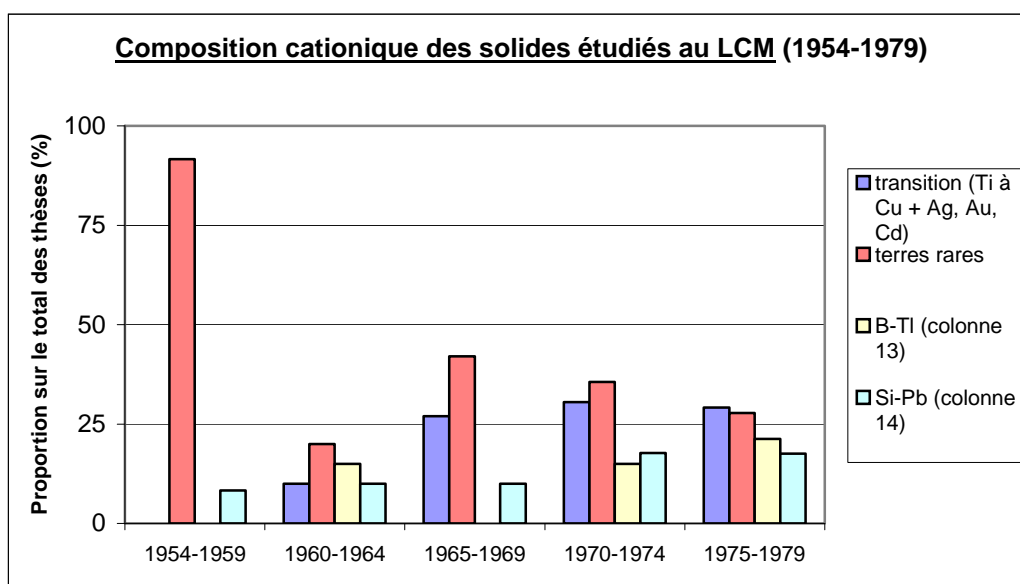


Premièrement, le nombre total de thèses augmente à chaque quinquennat (5 ; 5 ; 10 ; 14 ; 17), ce qui suggère un « programme de recherche progressif » [Lakatos, 1978] durant ces vingt-cinq ans. Rester focalisé sur une seule colonne du tableau périodique, la seizième sans l'oxygène, ne semble donc pas gêner le développement du laboratoire. Au contraire, ce choix « élémentaire » des chalcogénures est éminemment stratégique puisqu'il permet de s'approprier un domaine – socialement marginal, scientifiquement porteur – tout en contournant l'empire de la *Chaudronnerie*. En effet, au cours des années cinquante et soixante, les chalcogénures ne constituent pas un sujet à la mode contrairement aux oxydes métalliques. Au bout d'une quinzaine d'années (après le début de sa thèse), Flahaut est considéré comme le spécialiste français des sulfures métalliques.⁵

Si l'on affine l'analyse, comment évolue l'importance des catégories de solide ? Au cours de la décennie 1954-1964, les sulfures remportent la majorité absolue des suffrages (60 à 70% des travaux). Elle n'est plus que relative (40 à 50%) à partir de 1965. Tout au long de la période, le soufre reste l'élément le plus utilisé dans les thèses du laboratoire. Les tellurures représentent une proportion stable, autour de 20%, entre les années cinquante et soixante-dix. Ce sont principalement les séléniures qui prennent de l'importance passant de 10% (1960-1964) à 30% (1975-1979) des travaux en une quinzaine d'années. Enfin, les années soixante-dix conduisent à un timide renouvellement et une diversification des recherches vers les iodures (7 à 8%). Pourquoi choisir un halogène comme anion de base ? Au sein du tableau périodique, l'iode est le voisin direct du tellure et leur taille est voisine ; d'autre part son électronégativité est proche de celle du sélénium. Dans une optique de substitution graduelle, l'iode peut ainsi permettre d'introduire des différences intéressantes par rapport aux chalcogénures.

⁵ Par exemple, c'est Flahaut qui est choisi pour prononcer une conférence sur les « recherches récentes sur les sulfures métalliques » aux Journées de la chimie, organisées par la SFC à Rennes en 1959. La bibliographie de son texte contient cinquante-trois références dont seize de son propre laboratoire. Deux autres Français sont cités : M. Laffitte (deux fois) et Bertaut (une fois). On retrouve aussi les noms de Hägg (quatre fois) et de Glemser (une fois). Même si Flahaut aura plus tendance à citer les travaux de son laboratoire, l'écart est néanmoins saisissant [BSCF, 1960, p. 1290].

Si la nature de l'anion permet de distinguer quatre catégories de solide, le cation (ou contre-ion) joue aussi un rôle important dans la constitution chimique du solide. Voyons si, à nouveau pour le cation, Picon et Flahaut suivent une logique « élémentaire ». Initialement, la plupart des chalcogénures étudiés étaient des composés binaires. Au cours des années 1960, ceux-ci sont largement remplacés par des chalcogénures ternaires – un anion et deux cations ou deux anions et un cation –, voire quaternaires.⁶ La synthèse d'un composé ternaire résulte de la réaction de deux composés binaires différents. Pour comprendre la démarche du programme de recherche, j'ai cherché à voir si les thèses poursuivaient une systématique pour les cations. Comme précédemment, le diagramme suivant montre l'évolution de la nature des cations qui composent les solides étudiés. J'ai choisi d'adopter suivre la répartition « élémentaire » utilisée par les chimistes, en référence au tableau périodique. Quatre blocs principaux rassemblent la plupart des contre-ions mentionnés dans le titre des thèses : 1° les métaux de « transition » ; 2° les « terres rares » ($4f^n$) ; puis les éléments du « bloc p », 3° la colonne 13, du bore au thallium (mentionnée comme « colonne IIIB » par Flahaut) et 4° la colonne 14, du silicium au plomb (« colonne IVB »).⁷



Pour la deuxième moitié de la décennie 1950, ce sont les terres rares qui attirent l'attention de Picon et Flahaut. Ils représentent la quasi-totalité (92%) des cations présents dans les thèses solides. Pour les étudier au mieux, le LCM collabore avec le Laboratoire des terres rares (LTR) de Trombe, en particulier pour les synthèses de « sulfures et oxysulfures de terres yttriques » [RA CNRS, 1957, p. 52]. Flahaut et Trombe se connaissent d'ailleurs personnellement, se rencontrent à la Commission de chimie des hautes températures (V.1) dont ils font partie du bureau (respectivement secrétaire et vice-président). Par la suite, le LCM diversifie les

⁶ « Nous avons réalisé un grand nombre de diagrammes, binaires au début puis ternaires et quaternaires avec l'analyse thermique. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 9].

⁷ Les catégories sont celles des chimistes eux-mêmes basées sur le tableau périodique – et donc les propriétés des éléments –. Les éléments de transition de la première période sont définis par une orbitale électronique ($3d$) en cours de remplissage ($3d^n$, avec $1 < n < 9$) (sans le scandium et le zinc dont l'orbitale ($3d$) est respectivement vide et pleine). Les thèses mentionnent aussi l'argent, l'or et le cadmium comme métaux de transition. Les terres rares sont aujourd'hui définies comme la série du cérium au lutécium – les lanthanides – à laquelle sont rajoutés le lanthane, l'yttrium et le scandium, soient 17 éléments aux propriétés voisines [I Caro, 2005, p. 1]. Le « bloc p » désigne les éléments métalliques qui correspondent au remplissage des orbitales ($3, 4, 5, 6p^n$) sans les gaz rares, les halogènes, l'oxygène et l'azote.

cations et la prédominance des terres rares diminue. Au début des années 1960, la répartition des cations s'équilibre avec les autres blocs. Les métaux de transition – en particulier le titane et le vanadium – prennent de l'importance passant de 10% (1960-1964) à 30% au cours des années 1970. Les éléments de la colonne 13 – en particulier le gallium et le thallium – sont régulièrement utilisés au cours de la période avec une moyenne entre 10 et 15% des thèses. Enfin, les semi-conducteurs de la colonne 14 – silicium et germanium – connaissent une croissance lente mais régulière passant de 8% (1954-1959) à 18% (1975-1979) des cations employés.

Ainsi, l'analyse statistique confirme la fabrication de composés nouveaux et la diversification des éléments utilisés. On passe d'un fond homogène de sulfures de terres rares binaires ou ternaires à une mosaïque de chalcogénures mixtes de terres rares, métaux de transition ou éléments du « bloc p ». Cependant ces deux séries temporelles ne corréleront pas l'association des éléments entre eux au sein du composé, ni entre cations et anions, ni entre cations et cations. Or c'est de l'association de tous les éléments que dépend le solide final. Y a-t-il un effort systématique pour obtenir certaines associations « élémentaires » ? Si oui, pourquoi certaines sont plus intéressantes pour les chercheurs que d'autres ? Est-ce une conséquence chimique (impossibilité de certaines associations) ou un intérêt pour certaines propriétés physiques (induites par certaines associations) ? Quels sont les enjeux de la logique « élémentaire » à l'œuvre au sein du laboratoire ? Que nous apprennent-ils sur la disposition des éléments dans le tableau périodique ? Pour tenter une réponse à ces questions, je ne me lancerai pas moi-même dans une étude statistique systématique – qui conduirait pour les composés tertiaires à un tableau à trois dimensions –. Je préfère me concentrer sur les sulfures ternaires – comme ce sont les plus nombreux, ils offriront une meilleure corrélation statistique – et repérer les associations entre cations. Le tableau ci-dessous indique les associations cationiques des solides synthétisés en thèse.⁸

SULFURES	transition	terres rares	bloc s	B-Tl (colonne 13)	Si-Pb (colonne 14)	P-Bi (colonne 15)	métaux (non spécifiés)
transition	6	10		1	5	1	1
terres rares	N	4	1	2	3		1
bloc s	N	N		1			
B-Tl colonne 13	N	N	N		2	1	1
Si-Pb colonne 14	N	N	N	N			
P-Bi colonne 15	N	N	N	N	N		
métaux (non spécifiés)	N	N	N	N	N	N	

Le tableau ne donne pas vraiment de réponse claire aux questions précédentes. Il apporte cependant quelques pistes de réflexion : 1°) Les métaux de transition et les terres rares sont les éléments les plus communément rencontrés. Leur conjonction – sulfures mixtes de terre rare et d'élément de transition – correspond à la plus forte occurrence (10 composés). 2°) Il n'y a pas d'effort systématique pour que chaque bloc de cations soit associé à tous les autres : quinze cases sont occupées, treize sont vides (possibilités non explorées ou non concluantes). Le Laboratoire ne mène pas un projet d'association systématique. Au cours des années 1950, la synthèse originale ne constitue donc pas une obsession des minéralistes

⁸ Contrairement aux deux diagrammes précédents, ici chaque composé sulfuré indiqué dans un titre de thèse compte pour un. Chaque case repère une possibilité d'association entre le cation de la ligne et celui de la colonne. Les nombres décomptent l'ensemble des solides de chaque espèce, mentionnés dans les titres des thèses.

français. La logique « élémentaire » n'est pas la seule dynamique à l'œuvre dans le choix des composés à synthétiser. 3°) Les terres rares occupent une place privilégiée au cours de ces années. Ces éléments sont progressivement associés à tous les autres éléments métalliques – à part ceux de la colonne 15 – sans que préside à cette association un but explicite.⁹ 4°) Il est difficile de se prononcer sur les associations « élémentaires » privilégiées du tableau périodique. Le tableau périodique fait correspondre la périodicité du poids atomique (aujourd'hui, le numéro atomique) d'un élément chimique à la périodicité des propriétés des composés dérivés de l'élément. Mais il s'agit de composés purs (contenant un seul élément). Quelle est alors l'utilité du tableau périodique lorsqu'il y a association d'éléments binaire, ternaire, voire quaternaire ? Cette question, intéressante mais complexe, touche à l'épistémologie du tableau périodique.

IV.1.2. De la synthèse chimique aux diagrammes de phase : une option originale en chimie du solide ?

Flahaut connaît une ascension rapide à la faculté de pharmacie de Paris : promu « maître de conférences de chimie générale et minérale » – premier échelon des professeurs de l'époque – quatre ans seulement après la fin de sa thèse (1955), il devient professeur sans chaire (1960) puis professeur à titre personnel, à l'âge de quarante ans (1962) [Flahaut, 1982, p. 1]. Le Laboratoire de chimie minérale, que Picon lui lègue en 1966, est associé au CNRS dans la deuxième vague des laboratoires associés (1^{er} janvier 1967) comme « équipe de recherche » à cause d'une taille modeste. Flahaut a proposé le nom de « Laboratoire de chimie de l'état solide », qui est accepté en remplacement de chimie minérale. Que porte ce changement de nom ? Signifie-t-il un changement de style de recherche ?

Dès 1966, Flahaut et son équipe franchissent le Rubicon et quittent la chimie minérale pour se revendiquer de la chimie de l'état solide. En protégeant leurs arrières puisque, la même année, Flahaut est élu au Comité national dans la section chimie minérale. La chimie du solide « à la manière de Picon » ne bouleverse pas fondamentalement les catégories disciplinaires traditionnelle. Ancrée dans une synthèse des hautes températures, l'équipe de Picon s'est construite à partir des années 1950 sur ce savoir-faire spécifiquement chimique.¹⁰ Au cours des années 1950, les efforts se portent dans deux directions : le tracé de diagrammes de phase et la détermination des structures cristallines. Les deux sont liés. Tracer un diagramme de phase revient pour une composition donnée (un point sur l'axe des abscisses) à coupler une analyse thermique différentielle à une détermination structurale (déplacement sur une droite verticale). L'analyse thermique différentielle permet de repérer les changements de phase en fonction de la température tandis que la cristallographie permet d'attribuer une structure aux phases synthétisées.¹¹ Celles-ci sont soit reconnues si elles ont déjà été

⁹ « Les chalcogénures des terres rares (R_2X_3 pour les éléments trivalents, RX pour les éléments divalents) présentent la caractéristique de pouvoir se combiner à la quasi totalité des chalcogénures des autres éléments métalliques, *ainsi que nous l'avons constaté peu à peu* [c'est moi qui souligne]. Il se forme ainsi des dérivés ternaires à deux métaux et, parfois, des dérivés quaternaires à trois métaux. » [Flahaut, 1976, p. 14].

¹⁰ « S'orienter vers la chimie des hautes températures nous conduisait à des préparations multiples de composés nouveaux : Picon nous orienta vers les sulfures, les séléniures et les tellures. [p. 1] « Au fond, je ne sais pas pourquoi nous avons travaillé sur les sulfures au début. Peut-être est-ce la descendance Moissan, Lebeau, Picon ? » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 8].

¹¹ « nous faisons des diagrammes de rayons X sur des poudres, des études de solutions solide et nous avons tracé des diagrammes de phase par analyse thermique. – PT : *Quel est le principe de l'analyse thermique ?* – JF : On fait varier la température et on observe les changements d'état, les transitions de phase. Nous utilisons un appareil Netzch (du nom de la société qui les fabrique) : on fait varier T et aux changements de phases, on observe des ΔT par comparaison avec une référence témoin qui, elle, ne subit pas de transition. Nous étudions

répertoriées dans les tables de structure, soit nommées si elles sont inédites. Cette double orientation est pleinement assumée par Flahaut qui y voit en 1976 les « deux notions fondamentales [...] à la base de toute description d'un composé chimique » [Flahaut, 1976, p. 27]. Elle est corroborée par la ligne éditoriale du laboratoire : sur la période (1967-1981), les trois principales revues dans lesquelles le laboratoire publie sont la bible de la cristallographie (*Acta Crystallographica* : 26,3%), une revue spécialisée dans les matériaux solides (*Materials Research Bulletin* : 24,0%) et une revue chimique (*Comptes rendus de l'Académie des sciences* : 18,1%).¹² Enfin, troisième indice fort : au sein de la communauté, le laboratoire Flahaut est perçu par les pairs comme spécialiste des structures cristallines et des diagrammes de phase.¹³

Comment s'opère le glissement des questions de synthèse vers la détermination de structures cristallines ? Picon, semble-t-il, n'a pas trop poussé vers les caractérisations physiques.¹⁴ C'est plutôt dans son environnement proche que le laboratoire cherche son inspiration. Flahaut et ses étudiants fréquentent la Commission de chimie des hautes températures certes où sous l'impulsion de la *Chaudronnerie* ces questions sont débattues. L'intérêt spécifique pour les diagrammes de phase s'inspire d'ailleurs fortement des méthodes de la métallurgie (I.3.2). Le LCM effectue aussi un rapprochement avec son voisin, le laboratoire de physique, à la faculté de pharmacie. Pierre Laruelle, qui le dirige, y a développé une équipe de cristallographie. Cette collaboration, d'abord informelle au cours des années 1960, se solde par une union forte des deux entités – physique et chimique –, scellée par la fondation en 1972 d'un laboratoire associé au CNRS : le « Laboratoire de chimie minérale et structurale » (LCMS).¹⁵ Sur le plan social, elle permet de réduire l'isolement des « minéralistes » à la faculté de pharmacie en construisant une place-forte minérale au sein d'un territoire dominé par les médicaments et en revendiquant une légitimité auprès de la faculté des sciences.¹⁶ La création tactique d'un pôle bi-disciplinaire s'avère payante puisque

ensuite chaque phase grâce à la chambre à haute température qui permet de chauffer les échantillons et de réaliser des études de rayons X. Les variations des raies permettent de déterminer la nouvelle phase. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 7].

¹² Cette répartition est basée sur les 382 articles publiés par le laboratoire entre 1967 et 1981 [Flahaut, 1982]. Le rapport d'activité du laboratoire en 1987 reprend textuellement les mêmes chiffres [RA LCMS, 1987, p. 11], ce qui suggère que le rédacteur les trouve encore pertinent à ce moment-là.

¹³ « Jean Flahaut a beaucoup travaillé [...] sur] les sulfures de terres rares. C'est un type très important qui a fait beaucoup de structures de composés de sulfures justement. C'est un type remarquable, hyper-spécialisé dans les sulfures de terres rares. » [I Caro, 2005, p. 18]. C'est Daniel Vivien qui m'a vivement encouragé à rencontrer Jean Flahaut en précisant qu'il avait « étudié beaucoup de diagrammes de phase ». Lorsque, à sa requête, Danielle Simons (membre du LCAES) a lancé une recherche bibliographique dans la banque de données « *Inspec* » sur la période (1969-2005), elle trouva 110 références pour « Flahaut » (1969-1994) dont 48 contiennent le mot « *Phase-diagram* » dans le titre, le résumé ou les mots clefs.

¹⁴ À une question de Jacques Rivet « Picon était physicien aussi ? », Flahaut répond sans ambages : « C'était un mauvais physicien. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 8]. Même si ce jugement est relatif à ce que deviendra le *solidiste* par la suite – un physico-chimiste –, il situe le rapport que Picon entretient avec la physique : titulaire de la chaire de physique de la faculté de pharmacie pendant près de dix ans, il ne se fait pas prier pour accepter celle de chimie minérale à la mort de Damiens (1946).

¹⁵ « Parallèlement [vers 1966...] le professeur Laruelle créait, dans le cadre du laboratoire de Physique de la Faculté de pharmacie, un groupe de cristallographie. » [Flahaut, 1976, p. 6]. La collaboration entre physiciens et chimistes est de plus en plus forte : elle commence par des contacts informels entre voisins de laboratoire puis se concrétise par des co-directions de thèse. La thèse de Jacques Rivet par exemple (1965) est co-dirigée par Flahaut et Laruelle. En 1971, l'année précédant l'association, quatre des dix thèses soutenues au LCM sont co-dirigées selon ce mode [Flahaut, 1982, p. 9-11]. La première thèse mentionnant l'« étude de quelques propriétés [...] magnétiques » date de 1971 [Flahaut, 1982, p. 9-10].

¹⁶ « C'était au fond notre point faible vis-à-vis de la faculté parce que les pharmaciens ne comprenaient pas vraiment que l'on s'oriente vers ce genre de choses [les sulfures et les séléniures] » puis « Les profs de la fac des

le LCMS est associé au CNRS pendant vingt ans (1972-1992) en tant que laboratoire – ce qui est beaucoup plus intéressant en terme financier et de recrutement que la statut d'équipe –.¹⁷ La *Chaudronnerie* et la famille Trombe ont adoubé cette entité atypique qui a su s'allier précocement et formellement avec des physiciens pour se faire reconnaître au niveau national.

Au niveau méthodologique, l'association permet de renouveler les orientations du groupe, initialement basé sur la synthèse de nouveaux composés solides : d'abord, l'étude structurale est renforcée grâce aux cristallographes puis, par la suite, la question des propriétés physiques prend de l'importance au contact des physiciens.¹⁸ Au cours des années 1970, certaines thèses sont explicitement dédiées à l'étude de phénomènes plus théoriques – plus physiques ? – comme les transitions « métal-non métal » (1975) ou le « rôle du doublet $6s^2$ du thallium » (1976). D'autre part, l'importance croissante des éléments semi-conducteurs – gallium, germanium et silicium (colonnes 13 et 14) – marque une préoccupation pour les phénomènes électriques. L'évolution vers les interrogations plus physiques ne remet pourtant pas en cause l'inventivité chimique et surtout la connaissance des diagrammes de phase qui constituent la base et l'originalité du LCMS.¹⁹ La méthode expérimentale choisie par Flahaut au cours des années soixante-dix, quatre-vingt est mise en valeur par l'exemple des verres de chalcogénure ou « matériaux vitreux ». L'originalité de synthèse est déployée grâce à une « approche systématique » basée sur « la construction de diagrammes de phase ». L'étude des propriétés physiques – optiques et électriques dans le cas de ces verres – n'est réalisée qu'après, soit au sein du laboratoire, soit par d'autres équipes en France ou à l'étranger [RA LCMS, 1987, p. 10-11].

Un tel déploiement méthodologique – de la synthèse aux propriétés physiques – exige une organisation du travail efficace. En interne, le laboratoire – dirigé par Flahaut (1966-1984) – est structuré suivant des « équipes » de recherche, dont chacune est spécialisée sur un domaine différent. En 1972, l'équipe associée, qui regroupe une trentaine de membres, s'agrège au groupe Laruelle. Quatre équipes sont alors constituées, trois dirigées par des anciens élèves de Flahaut, la quatrième par Laruelle et les siens : 1° « synthèse à haute température » (Mlle M. Guittard, 12 personnes), 2° « diagrammes de phase » (Rivet et Dagrón, 12), 3° « études physiques et structurales de composés d'éléments de transition » (O. Gorochov et G. Collin, 9), 4° « structures cristallines sur des monocristaux » (Laruelle, Étienne, D. Carré, 15). Chaque équipe se concentre sur une étape spécifique le long de la chaîne des savoir-faire : synthèse, thermodynamique, structure-propriétés, étude physique des monocristaux.²⁰ Mais une collaboration transversale se met aussi en place. Ainsi, les équipes

sciences nous ont fait passer énormément de thèses, ils venaient ici et quelquefois nous y allions. Ça dépendait des jurys, de la possibilité pour les membres de se déplacer. Mais ils nous connaissaient très bien ces deux hommes-là [Bénard et Collongues]. Nous avons d'excellents rapports, nous avons – il faut bien le reconnaître – beaucoup plus de rapport avec la fac de sciences qu'avec celle de pharmacie. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 1-2].

¹⁷ « PT : Et ça fait une grosse différence entre un labo associé et une équipe associée au CNRS ? – JF : Oh oui : au niveau des crédits, des recrutements... » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 3].

¹⁸ « Au début, nous étions purement chimiques puis nous nous sommes associés avec le laboratoire de physique dirigé par Pierre Laruelle, ce qui nous a orienté vers l'aspect structural des composés puis ça a débouché sur les propriétés physiques : électriques, magnétiques, etc. (p. 1) [...] Le groupe de Laruelle faisait uniquement la cristallographie au début. Ensuite ils sont passés aux études des propriétés physiques, la RMN, l'EXAFS (p. 3) [...] Au départ, nous avons réalisé quantité de synthèses. Ensuite, après la fusion avec Laruelle, nous avons étudié les propriétés physiques structurales et enfin, après 1975, les propriétés magnétiques et électriques. » (p. 7) [I Flahaut & Rivet, 2005].

¹⁹ « Quelle que soit la finalité de nos recherches, nous les aborderons toujours sous l'angle le plus fondamental, et veillerons à ce que, chaque fois, les études de propriétés physiques ne soient commencées que lorsqu'elles pourront reposer sur de solides approches (diagrammes de phases et structure cristalline en particulier). » [RA LCMS, 1976].

²⁰ La troisième équipe travaille à la « compréhension des propriétés physiques en relation avec la structure électronique (valence) » pour des « matériaux de structure simple » composés d'éléments de transition [RA LCMS, 1976, p. 2-18].

de chimistes (1^o, 2^o, 3^o) fournissent celle de physique en composés originaux. Un service technique – « atelier » (une personne) et administration (4 personnes) – se déploie transversalement par rapport aux quatre équipes. Le souffleur de verre est rattaché à un service général de la faculté. Une cinquantaine de personnes travaillent alors ensemble au sein du laboratoire (1976). Lorsque les caractérisations dépassent les compétences endogènes, le laboratoire s’allie avec d’autres centres de recherche, en chimie ou en physique, dans un souci de complémentarité.²¹ Les collaborations peuvent être ponctuelles – caractérisation d’un monocristal très spécifique – ou se prolonger durant plusieurs années. Au cours des années 1970 et 1980, le LCMS collabore avec les physiciens du solide d’Orsay (Guinier, Jérôme) pour la « microscopie électronique », la « sonde Castaing », l’EXAFS et avec les spectroscopistes de Thiais (Lucazeau). Parmi ses pairs, il entretient des liens durables avec le Laboratoire des terres rares (en 1970, Flahaut fait partie de son Comité de direction, Collin, l’un des co-directeurs d’équipe est un ancien élève de Jean Loriers du LTR) et avec le service Collongues au CECM (IV.3). Plus ponctuellement, il collabore avec Lyon (Cueilleron, Bousquet), Nantes (Rouxel), Bordeaux (Hagenmuller).²² Le Laboratoire exporte aussi ses compétences en dehors de l’hexagone en collaborant activement avec le *Laboratory of Engineering and Chemistry* de Aaron Wold à Brown University (Providence, États-Unis) et avec les cristallographes flamands d’Anvers, le *Rijksuniversitair Centrum Antwerpen* dirigé par S. Amelinckx (lui-même lié à Wyart (I.conclusion)) [RA LCMS, 1976, p.52].²³ Flahaut s’occupe aussi de préserver les collaborations avec les anciens territoires colonisés comme en Côte d’Ivoire avec le Laboratoire de chimie minérale d’Abidjan.

En conclusion, comment définir en quelques mots le travail du laboratoire et le situer par rapport aux catégories disciplinaires en vigueur à l’époque ? Héritier séculaire de la chimie des hautes températures et du père fondateur qu’est Moissan, le Laboratoire de chimie minérale se bâtit sur un territoire confiné, « élémentaire » – les chalcogénures métalliques, en particulier de terres rares – grâce à une méthode propre qui articule un savoir-faire chimique (synthèse à haute température) à une maîtrise des diagrammes de phase (thermodynamique et structure cristalline). C’est en collaborant avec la physique, en développant toujours plus l’aspect structural, qu’il devient équipe associée de « chimie de l’état solide » (1967). Pensant aux avantages du laboratoire associé mais sans renier son identité chimique, le groupe Flahaut régularise ses échanges avec les physiciens du groupe Laruelle en s’associant avec eux. Par cette union institutionnelle (1972), le nouveau laboratoire se redéfinit en changeant de nom : « chimie minérale et structurale ». Ce nouveau titre rend compte d’une double filiation historique – minérale pour les chimistes, cristallographique pour les physiciens –. Lorsqu’en 1984 Flahaut est contraint par la « règle des douze ans », instaurée par la loi d’orientation de

²¹ « pour des raisons évidentes de crédits, de personnel et de compétence, les techniques physiques ainsi installées sont en nombre restreint, tout laboratoire de chimie de l’état solide, plus que tout autre laboratoire de recherche, se voit obligé d’établir, en fonction des matériaux envisagés et des problèmes à résoudre, des collaborations extérieures, soit avec un autre laboratoire de chimie qui possède les techniques complémentaires, soit avec un laboratoire de physique de l’état solide. » [Flahaut, 1976, p. 8]. « Nous collaborions avec des gens qui allaient plus loin que nous dans les études complémentaires, pour les études structurales ou les propriétés magnétiques. On travaillait beaucoup à la fac des sciences d’Orsay. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 5].

²² « JF : Oui, nous avons beaucoup collaboré avec Collongues. Nous n’avons pas tellement collaboré avec Bordeaux. – JR : Nous avons eu des collaborations avec le Laboratoire des Terres Rares, avec Caro à Meudon [...] On connaissait bien Rouxel. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 6]

²³ Ces deux collaborations internationales sont sans doute les principales parce que c’est à nouveau sur elles que Flahaut et Rivet insistent près de vingt ans plus tard. « JF : [...] Nous avions des collaborations... – JR : Notamment en Belgique avec Amelinckx... – JF : ça a été très efficace. [...] Aron Wold ». D’autres collaborateurs sont cités : « Mme Riesfeld en Israël [...] On a travaillé avec un type formidable au Danemark qui s’appelait Jorgensen : il avait plein d’idées, il était tout à la fois, chimiste, physicien et cristallographe, sa plus grande joie était d’avoir quelque chose à résoudre. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 5-7].

1982, de quitter la direction du laboratoire, on choisit l'alternance puisqu'il est remplacé un physicien, D. Carré, formé par Laruelle. Le LCMS offre donc l'image d'un laboratoire frontalier qui a fait le pari d'une chimie du solide à la conjonction d'un objet « élémentaire » – les chalcogénures de terres rares – et d'une méthode assumée – les diagrammes de phase –. S'il n'a pas cherché à tout prix à s'imposer socialement, à coloniser les commissions CNRS, Flahaut est pourtant reconnu comme l'un des principaux solidistes de sa génération.²⁴

IV.2. Le Laboratoire des terres rares ou le type « élémentaire-instrumental » (1950-1992)

Après-guerre, le petit laboratoire que Georges Urbain avait monté à l'École de chimie de Paris (ENSCP en 1948) est transféré sur le campus de Bellevue où il est rattaché au CNRS. Le Laboratoire des terres rares (LTR) se place résolument dans la lignée des travaux menés par son fondateur Georges Urbain (III.2.1.3). Comme pour le LCM (IV.1.1) le choix « élémentaire » opéré est antérieur à l'ère de la chimie du solide (1950). Comme dans le cas de Flahaut, l'héritier du choix « élémentaire » – Félix Trombe – confirme pleinement l'orientation historique de son prédécesseur. L'émergence de la chimie du solide à partir des années cinquante se situe donc dans le sillage des orientations « élémentaires » de ces deux laboratoires. Autre point commun entre les deux laboratoires : la synthèse des solides s'appuie sur des techniques de haute température. La Commission de chimie des hautes températures constitue un espace de convergence entre les deux laboratoires (V.1).

Au niveau national, Trombe est un mandarin atypique : ayant raté son baccalauréat mais diplômé de Chimie Paris (1928), il ne peut briguer les postes universitaires²⁵ et mène toute sa carrière au CNRS. En marge de la Sorbonne (I.2.3), il enseigne à l'École nationale supérieure de chimie de Paris (ENSCP) dont il connaît personnellement le directeur, Chaudron, qu'il fréquente par ailleurs à la Commission de chimie des hautes températures. Occupé de chimie de l'état solide et de hautes températures, Trombe se trouve en concurrence scientifique directe avec la *Chaudronnerie* mais tient tête socialement à Chaudron.²⁶ Au sein de son laboratoire, il impressionne les étudiants et en impose aux jeunes chercheurs : on doit lui dire « Monsieur » sinon il se fâche !²⁷ Pourtant, il n'est pas un « patron » au sens de Chaudron (II.2), Collongues (IV.3) ou Hagenmuller (IV.4). En effet, si ceux-ci ont méticuleusement organisé et rationalisé l'espace de recherche, Trombe favorise la « libre-entreprise » au sein du laboratoire. Au modèle de l'usine à thèses, il a préféré une recherche « artisanale » où chaque collaborateur dispose d'une large autonomie. Rigoureux il l'est pour

²⁴ « Dans l'histoire de la chimie du solide, il y a un grand chimiste qu'on néglige et dont on parle peu, c'est Jean Flahaut, dont le groupe était isolé à la faculté de pharmacie, à Paris. » [I Tournoux, 2006, p. 9].

²⁵ « Trombe est un chercheur original, qui a commencé par rater son bac. Pour cette raison, il ne pourra jamais prétendre par la suite aux honneurs universitaires. » [I Caro, 2005, p. 1].

²⁶ « tous ceux de la génération de Trombe étaient pareils. Je me rappelle la soutenance de thèse de Schiffmacher, c'était Chaudron le président du jury, c'était à vous faire peur ! – PT : *Qu'est-ce qui se passait ?* – EA : Peut-être qu'il avait un compte à régler avec Félix Trombe et c'est le candidat qui a tout pris sur sa tête (rire). – PT : *Vous pensez qu'entre Trombe et Chaudron, c'était tendu ?* – EA : Peut-être, le candidat a tout pris. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 3-4].

²⁷ « C'était le grand patron, il y avait une distance par rapport à moi mais avec les autres étudiants aussi je crois. Ça a changé ensuite quand les nouvelles générations sont venues. Lui, c'était le Monsieur : je me rappelle qu'une fois, je lui ai dit « Monsieur Trombe » et il n'était pas content, il fallait dire « Monsieur ». » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 3].

son propre travail mais n'est pas directif avec celui des autres.²⁸ Aux étudiants entrés au laboratoire, il propose un sujet puis les laisse débrouiller ensuite, tâtonnant seul ou trouvant un appui auprès des chercheurs plus anciens.²⁹

Malgré cette impression quotidienne de laisser-aller, le LTR est officiellement découpé suivant quatre « sections » associées à des sujets précis : « séparations et synthèses physico-chimiques » (section A), « spectrographie » (section C), « métallurgie et mesures physiques », « alliages ». En 1964, ces deux dernières sections fusionnent pour donner la section B : « métallurgie, alliages et mesures physiques » [RA CNRS, 1958 ; 1964]. Si un individu, préférant un désordre créatif à un ordre dirigiste, s'efforce d'orienter des groupes dans des directions spécifiques, c'est qu'il pense que la division du travail a néanmoins un sens dans le cas des terres rares. Je cherche à comprendre comment le choix « élémentaire », fixé par l'héritage d'Urbain, a induit le développement d'une méthodologie bien particulière. Dans quelle mesure synthèses, caractérisations, théories ou applications vont-elles être déterminées par le choix initial des terres rares ? Dans quelle mesure l'organisation sociale est-elle modelée, commandée, par les traits particuliers du champ d'investigation ?

IV.2.1. Similarités chimiques, réactivité et purification « élémentaire » (1950-1964)

Les terres rares ont des propriétés chimiques très voisines, elles sont difficilement distinguables et facilement oxydables. À l'état naturel, elles existent sous forme de minerais d'oxydes dans lesquels les éléments sont mélangés. Obtenir des composés solides utilisables par le chimiste pose deux problèmes de taille, le premier de séparation des éléments de terres rares les uns par rapport aux autres, le second, de réduction des oxydes pour obtenir des métaux, éventuellement purs. La section « séparations et synthèses physico-chimiques » travaille sur ces questions. Trombe a choisi l'un de ses premiers thésards, Jean Loriers, pour diriger la manœuvre.³⁰ Au début des années 1950, le pays leader pour les terres rares n'est plus la France, avec sa chimie universitaire à la Urbain, mais les États-Unis, de la recherche appliquée planifiée par l'État, suite au projet Manhattan [N'Diaye, 1998 ; 2001] (III.2.1.3). "La Mecque" de la séparation des terres rares se situe désormais à Ames, dans l'Iowa. À partir de 1947, Spedding et ses collaborateurs commencent à publier les résultats obtenus pendant la guerre sur les « techniques d'échanges d'ions » [Spedding, 1947]. Ces méthodes physico-

²⁸ « Le mot "organisation" n'allait pas forcément avec Trombe (rires !). Non, il était très organisé pour la planification de son travail [...]. Il n'avait rien à déléguer parce que si vous voulez, c'était une petite boutique d'artisanat et tout le monde était maître de sa petite échoppe, essayait de collaborer avec ses collègues, ce qui se faisait sans difficulté car il s'agissait de partager les appareils, chacun était maître de son truc. [...] Alors méthode Trombe ? oui si l'on peut dire, un méthode de libre entreprise, ce n'était pas directif. » [I Caro, 2005, p. 9-12]

²⁹ « en ce qui concernait les thésards, c'était en gros : "vous étudiez ça et je vous reverrai l'année prochaine." C'était comme ça que fonctionnaient les patrons autrefois, c'est comme ça qu'Urbain avait dû faire avec lui. Le thésard devait apprendre à se débrouiller tout seul. Il y en avait d'ailleurs qui ne supportaient pas et qui ont quitté la recherche à cause de cela. – PT : Il n'y avait pas de suivi régulier en fait ? – PC : Non, il n'y avait pas de suivi régulier, les premiers suivis réguliers que j'ai connus, c'était aux États-Unis bien évidemment. » [I Caro, 2005, p. 9-10]. Au début, en 1963, « ma thèse [...] elle portait sur l'étude du comportement du lanthane dans les plasmas d'arc électrique. Même si c'était dans le groupe de Blandin, j'étais toute seule sur ce type de sujet au laboratoire. Ça n'avancait pas tellement bien » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 1].

³⁰ Comment Trombe choisissait-il ses lieutenants ? Certes, chaque section est dirigée par l'un ou l'une de ses premiers élèves. Y a-t-il un choix spécifique en fonction de la thèse effectuée ? Loriers pour sa part a travaillé sur une « contribution à l'étude des métaux pyrophoriques. L'oxydation du cérium et de l'uranium » (1946-1952), sujet que l'on peut qualifier de « chimique » [RA LTR, 1969, liste des publications].

chimiques sont plus sélectives que les méthodes chimiques développées entre-deux-guerres par Urbain.

Loriers et son équipe reprennent les résultats publiés et adaptent les colonnes échangeuses d'ions en utilisant de « nouveaux agents complexants » pour varier les séparations [RA CNRS, 1958, p. 52]. Ces réglages font appel à la chimie minérale : chimie des complexes et chimie en solution (choix des éluants, débit, pH...). Le travail de Bellevue est cité par l'école américaine, même si c'est pour le critiquer.³¹ Le LTR oriente une partie des recherches vers la purification des éléments par résines échangeuses d'ions durant une dizaine d'années (1948-1958). Par la suite, la purification devient une activité de routine, qui est confiée à deux techniciennes.³² Malgré le peu de moyens par rapport à Ames, le LTR n'a pas renoncé à la séparation à l'échelle semi-industrielle que souhaitait Urbain en fondant le Laboratoire des gros traitements chimiques (II.2.1.4). Les colonnes échangeuses d'ions font partie des « gros appareillages » du Laboratoire. Chacune ayant un diamètre différent, elles permettent d'adapter les débits pour traiter des quantités de produits diverses, du microgramme pour la recherche à l'échelle du kilogramme pour la production.³³ Outre la séparation « élémentaire », le LTR poursuit la synthèse de composés purs, soit sous forme de métaux et d'alliages, soit sous forme de composés ioniques : oxydes et sulfures principalement. Ceux-ci sont obtenus par réaction entre composés ioniques, ceux-là par réduction des composés ioniques (halogénures, oxydes) par un métal plus réducteur comme le calcium. Ces séparations et synthèses renvoient à la chimie des hautes températures et à la métallurgie.

Qui plus est, les terres rares nécessitent des savoir-faire spécifiques, notamment pour la fabrication des métaux. Comme les métaux sont oxydables par l'air, les métallurgistes de la section B – dirigée par Charlotte Henry La Blanchetais (V.2.1) – doivent opérer sous atmosphère contrôlée ou sous vide. La réduction nécessite aussi de hautes températures. Deux types de fours sont utilisés : trois fours à haute fréquence – 5, 12 et 25 kW – un four à rayons cathodiques – 5kW –. Ils sont gérés par la section « métallurgie » ainsi que les pompes à vide – d'un débit compris entre 100 et 850 litres par seconde [RA LTR, 1965, p. 14]. Une fois synthétisés les métaux, extrêmement réactifs à haute température, réagissent avec les creusets, censés les contenir. L'équipe développe alors des techniques de chauffage sans creuset, c'est-à-dire en « auto-creusets », les réactifs assurant le rôle du creuset en évitant la

³¹ Alors qu'il est en pleine gloire, en 1961, Spedding co-édite un ouvrage de référence sur les terres rares [Spedding & Daane, 1961]. L'ouvrage est principalement rédigé par lui et ses collaborateurs, en tout cas par des scientifiques américains. Chaque chapitre technique est saupoudré de références historiques, qui pourront intéresser l'historien – même si la partie historique recourt au politiquement correct et à diverses complaisances (histoire « whiggish », scientisme, ethnocentrisme) –. Parmi elles, le travail du LTR est mentionné comme suit : « *The use of citrate for macro-scale separations has also been investigated by Pinta [à Bellevue en 1953], Trombe and Loriers [CRAS, 1953, 236, p. 1567-1569, 1670-72], Loriers and Quesnay [CRAS, 1954], and Loriers [CRAS, 1956]. These investigators, however, were not particularly successful in their separations since they used 5% citrate at pH's from 2.8 to 3.4. In this pH range "elution" chromatography rather than displacement chromatography occurs, and the column loading in their experiments was too high for "elution" chromatography to be successful.* » [Spedding & Daane, 1961, p. 61].

³² En 1964, le rapport d'activité du laboratoire indique que la séparation des éléments est désormais assurée par deux techniciennes : Mlle Rouyer et Mme Gracian, ce qui suggère le passage à une activité de routine [RA LTR, 1964, p. 14-4].

³³ « À Bellevue, Trombe mène avec Jean Loriers la séparation des terres rares à grande échelle avec échanges d'ions. Le Laboratoire n'a bien sûr pas la même taille ni les mêmes moyens que le laboratoire d'Ames. » [I Caro, 2005, p. 2]. La section de « séparations » dispose de « (6 colonnes polyvinyle [diamètre] 38cm, longueur 2,80cm) (17 colonnes pyrex [diamètre] 12cm, longueur 1,50m et accessoires) » achetées sur des crédits CNRS et « 6 colonnes [...diamètre] 17cm, longueur 2m) » attribuées par la Section française de l'Exposition internationale de Bruxelles [RA LTR, 1965, p. 13].

« contamination ». Le four cathodique joue ce rôle à Bellevue.³⁴ Une autre solution consiste à utiliser des creusets inertes comme le tantale mais elle dépend des approvisionnements industriels, qui coûtent cher.³⁵ Lorsque la pollution est trop importante lors de la synthèse, des techniques sont utilisées pour purifier a posteriori, par « sublimation » par exemple [RA LTR, 1964, p. 14-15]. Des quantités variables de métaux – entre le gramme et le kilogramme – sont fabriquées ainsi suivant les besoins [RA LTR, 1958, p. 52]. Vers 1960, dans un laboratoire de recherche, c'est le système D qui permet de s'en sortir au quotidien. Les thésards apprennent à bricoler. Le savoir-faire des techniciens, peu nombreux, constitue un élément-clé de réussite.³⁶

La maîtrise des synthèses et purifications permet de disposer de terres rares sous des formes variées. Le LTR se fait donc pourvoyeur de matières premières pour d'autres laboratoires français de chimie ou de physique : des « ferrites de terres rares » pour le Laboratoire du magnétisme de Bellevue, dirigé par Charles Guillaud ; « sulfures et oxysulfures de terres yttriques » pour le LCM de Picon [RA CNRS, 1958, p. 52]. Un réseau d'échanges don-contre don se met ainsi en place entre le LTR et quelques laboratoires français, surtout de physique. Le CNRS favorise ces échanges lorsqu'en 1963 il crée la RCP n°20 visant à fournir les physiciens en oxydes de terres rares, en quantité suffisante et de bonne qualité. La production au LTR est devenue une activité de routine pour laquelle les rendements sont excellents, le taux de pureté étant compris en « 99,9 et 99,99% ». Le LTR assure alors l'approvisionnement de plusieurs laboratoires universitaires de la région parisienne, surtout en physique des solides et optique.³⁷

Le Laboratoire d'électrostatique et de physique du métal (LEPM), dirigé par Néel, à Grenoble (I.3) ne bénéficie pas vraiment des faveurs de Trombe. Étonnamment, lorsque Néel et Bertaut sollicitent le LTR en 1954 pour obtenir des terres rares purifiées, il semble que Trombe refuse d'abord de collaborer avec eux. Ce n'est que, deux ans plus tard en 1956, lorsque les grenats de terres rares commencent à prendre de l'importance que Trombe accepte

³⁴ Les terres rares « posent beaucoup de problèmes car elles s'oxydent facilement à l'air et sont par conséquent difficiles à synthétiser. La préparation des terres rares exige le recours aux hautes températures en milieu contrôlé. Il s'agit de travailler à des températures de l'ordre de 1500°C. À de telles températures, la plupart des creusets utilisés fondent (à part quelques composés d'oxydes réfractaires), d'autre part, les métaux des terres rares sont très réactifs et attaquent tout [...]. Pour s'affranchir des problèmes de pollution, il fallait avoir recours aux techniques de fusion sans creuset : Trombe mit au point un four à rayon cathodique (c'est-à-dire à électrons) pour travailler sans creuset, puis un four solaire à Meudon bricolé avec des miroirs de DCA. » [I Caro, 2005, p. 2].

³⁵ « Après-guerre, Trombe utilisait des creusets de tantale pour réaliser des calciothermies. » [I Caro, 2005, p. 2]. « Pour qu'il y ait une bonne métallurgie des lanthanides, il a fallu attendre que l'industrie prépare du tantale assez résistant. Dans les années 1960, il y a eu des feuilles de tantale suffisamment convenables - en provenance d'Autriche, je crois - pour qu'on puisse tenter de les souder sous vide. C'était d'ailleurs des crises nerveuses fréquentes car on loupait 9 creusets sur 10. Et cela coûtait très cher. » [I Caro, 2002, p. 2].

³⁶ « C'était quand même un artisanat assez héroïque, l'un des moyens de fabriquer les métaux des terres rares, c'était de les faire dans les creusets de carbone : on recevait des barres de Carbone Lorraine de 10 cm de diamètre et dans l'atelier du laboratoire, on faisait des trous dedans. L'état charbonneux du système était assez redoutable ! (rire) On fabriquait nous-mêmes un tas de trucs, on pétrissait l'amiante à pleines mains pour faire des fours, des choses comme ça. Quand j'y repense aujourd'hui, je trouve cela horrible mais c'était un immense bricolage. [...] On avait un atelier avec UN technicien. On faisait le boulot nous-mêmes sous sa direction bien entendu. » [I Caro, 2005, p. 10].

³⁷ « Section A : RCP n°20 pour les éluants [...] Les opérations de production [...] ont permis, en 1964, la préparation de plusieurs centaines de grammes d'oxydes de bonne pureté (variant de 99,9 à 99,99%) : oxyde de néodyme, de praséodyme, de gadolinium, de thulium, d'ytterbium, de lutécium et d'yttrium. Divers échantillons ont été fournis à titre d'aide à des laboratoires extérieurs : à Bellevue : Laboratoire Aimé Cotton, du Magnétisme, des rayons X, des Echanges Thermiques ; à Orsay : Institut du Radium ; à Paris : Ecole de Physique et Chimie [Laboratoire d'Optique, B. Briat], Laboratoire de Physique de la Sorbonne, etc. » [RA LTR, 1965].

finalement de fournir vingt grammes d'oxydes de terres rares d'une pureté de 99,5 à 99,8%. Les résultats obtenus par les physiciens sont d'ailleurs meilleurs.³⁸ Y a-t-il des incompatibilités personnelles entre Trombe et Néel ? En 1963, le LEPM n'est pas mentionné comme client du LTR dans la RCP n°20. Néel a-t-il préféré sécuriser son approvisionnement autrement ou développer ses propres synthèses et purifications au sein du laboratoire grenoblois ? Mystère des relations humaines. Quoiqu'il en soit, il semble que l'entente peu cordiale du début s'urbanise puisqu'en 1969, le LTR et le LEPM co-organiseront entre Paris et Grenoble un fameux congrès international du CNRS sur les terres rares.

IV.2.2. De la propriété aux applications : un « laboratoire propre » dépendant de l'industrie (1961-1970) ?

IV.2.2.1. Des trois visages de la propriété physique

Les terres rares ont des propriétés chimiques voisines, ce qui rend non seulement leur séparation délicate (IV.1.2.1.) mais encore leur identification problématique. À chaque étape de la synthèse ou de la purification, le chimiste contrôle le produit obtenu pour vérifier son identité. Reconnaître ce qui a été fabriqué tel est l'un des leitmotivs du chimiste. Comme de plus en plus de laboratoires vers 1960, le LTR recourt à la diffraction des rayons X pour déterminer la structure cristalline des solides.³⁹ Bien souvent, la diffraction X n'est pas suffisante pour établir l'authenticité « élémentaire » parce que, au-dessous d'une certaine quantité (5%), elle ne permet pas de discriminer les terres rares entre elles. Plutôt que déterminer une structure cristalline, il s'agit de recueillir une empreinte de chaque élément chimique. Pour cela, la spectroscopie donne de meilleurs résultats car chaque spectre optique peut être considéré comme caractéristique de l'élément.⁴⁰ Ainsi à une similitude des propriétés chimiques des terres rares correspond une différence de propriétés optiques. Les deux sections spécialisées dans la synthèse (A, B) sont d'ailleurs équipées de spectrophotomètre pour contrôler les impuretés. La spectroscopie joue donc un double rôle au cours de la synthèse et après : détermination élémentaire et dosage analytique. Comme chaque élément des terres rares fournit un spectre optique différent, qu'une faible quantité de terre rare est repérable (quelques ppm) et que la spectroscopie est une technique quantitative, la spectroscopie des terres rares permet de donner la composition chimique d'un solide en chaque élément de terres rares. La propriété optique sert de test d'identification d'un élément

³⁸ Le LTR n'est pas le seul laboratoire de chimie à travailler sur les terres rares au cours des années 1950. Déjà en mai 1950, Forestier à Strasbourg a publié un article aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences* sur la synthèse des ferrites de terres rares. À sa suite, les physiciens de Grenoble se lancent dans l'aventure des terres rares. C'est d'abord Forestier qui les fournit en terres rares, ce qui conduit Bertaut à la synthèse et à la caractérisation d'un oxyde mixte nouveau fer-gadolinium, de formule $5\text{Fe}_2\text{O}_3, 3\text{Gd}_2\text{O}_3$. Les « ferrites grenats » révèlent alors les propriétés intéressantes qui feront la gloire des Grenoblois [Pestre, 1990, p. 97-110].

³⁹ Au cours des années 1950, « nous faisons encore beaucoup de diagrammes de phase à l'époque. C'était une des spécialités de Chaudron car ils étaient couramment employés en métallurgie. [...] Au cours des années 60, les diagrammes de poudres de RX (avec des dispositifs du type chambre de Guinier) étaient notre outil favori. » [I Caro, 2005, p. 3-4]. Un « appareillage de diffraction X » vient d'être acheté par la section C en 1965 tandis que la section A en possède déjà un [RA LTR, 1965, p. 13, 16].

⁴⁰ « C'était essentiellement de la spectroscopie d'absorption et d'émission. Pour nous, dans le cas des terres rares, la spectroscopie optique est beaucoup plus précise parce que les spectres des terres rares sont caractéristiques d'une terre rare à une autre, et de toutes petites quantités (qq ppm) d'impuretés terres rares peuvent être décelées. Pour les rayons X, il faut au moins 5% en quantités. Il y avait aussi la fluorescence X. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 1-2].

chimique (reconnaître son identité spectroscopique). Il s'agit là d'une propriété-contrôle. Urbain et d'autres physico-chimistes y recourraient déjà au début du vingtième siècle pour identifier les terres rares [Claro-Gomès, 2003].

À partir des années soixante, les spectres optiques ne fournissent plus seulement un outil de contrôle et sont désormais étudiés pour eux-mêmes. La propriété physique est perçue comme une source de connaissance, elle devient alors propriété-essence. Inscrite dans une logique purement cognitive, l'étude du phénomène se suffit à elle-même. C'est au sein de la section C – « spectrographie » – dirigée par J. Blandin que se développent ces études cognitives. La section est bien mieux équipée que les autres avec quatre spectrographes différents : « Jarrell-Ash » (à arc et à étincelle), « fluorescence X », « émission X », « résonance paramagnétique électronique »* [RA LTR, 1965, p. 16]. Plusieurs longueurs d'onde peuvent ainsi être sollicitées entre visible (10^{-6} m) et rayons X (10^{-12} m à 10^{-9} m) pour des analyses qualitatives ou quantitatives. L'expertise en spectroscopie des terres rares permet ainsi d'obtenir des informations sur la liaison chimique et sur l'environnement des ions de terre rare.

Au delà de la performance synthétique et de l'intérêt cognitif, isoler et purifier les composés de terres rares recouvre un enjeu appliqué. Les solides contenant des terres rares sont de plus en plus utilisés pour leurs propriétés réfractaires (IV.3), magnétiques ou optiques. À partir des années 1960, sous l'influence américaine, les terres rares « explosent » sur le marché des applications. À nouveau, c'est leur présence dans les minerais d'actinides qui les porte sur le devant de la scène. Les stratèges militaires états-uniens se sont mis en tête de construire un avion supersonique à propulsion nucléaire. Celui-ci aurait dû voler plus vite, plus loin et plus longtemps. Ce projet « absurde » [I Caro, 2005, p. 3] était tout à fait sérieux et associait l'*US Air Force* aux industriels de *General Electric*. D'abord secret-défense, le projet est récupéré par Polichinelle dans le contexte d'intoxication médiatique de la guerre froide. En juin 1961, la Délégation générale à la recherche scientifique et technologique (DGRST) rédige une note explicative sur le sujet à l'attention du Premier ministre, Michel Debré (1959-1962) via son organe de presse : *Le Progrès scientifique*.⁴¹ La nouvelle paraît crédible au comité de rédaction de la revue, pourtant réputé sérieux.⁴² Suite au fiasco de l'aventure, *General Electric* se retrouve avec de grandes quantités d'yttrium obtenu lors de la purification des actinides. Pour gagner de l'argent, il faut lui trouver un débouché. Or, l'yttrium possède des propriétés optiques intéressantes. Finalement, il servira de luminophore* pour les écrans cathodiques de télévision couleur sous forme d'« oxysulfure d'yttrium dopé à l'euporium » dont Rhône-Poulenc assurera la séparation pour le monde entier.⁴³ Le traitement chimique –

⁴¹ « La Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique ayant été sollicitée, à maintes reprises, pour assurer auprès des milieux parlementaires, des grands corps de l'Etat, des cabinets ministériels et des directions de Ministères, une action d'information permanente consacrée à la vie scientifique internationale, il vous est présenté, aujourd'hui, le premier numéro d'un bulletin de presse "LE PROGRES SCIENTIFIQUE", qui vous sera adressé dorénavant suivant une périodicité bi-mensuelle. » [*Le Progrès scientifique*, 1961, n°1].

⁴² Dans le numéro du 1^{er} juin 1961, à la rubrique « Notes d'Information sur la Presse Quotidienne » – ce qui indique que la nouvelle n'est pas secret-défense mais a déjà été publiée par ailleurs –, un paragraphe « avion atomique américain » rend compte du projet : « L'utilisation de l'énergie atomique pour la propulsion des avions est l'objet d'essais réalisés par la Compagnie General Electric à Idaho, où un prototype de réacteur pour avion est soumis à des épreuves de longue durée : 65 et 120 heures consécutives d'utilisation. D'après les ingénieurs de cette firme, les premiers avions équipés de réacteurs nucléaires seront prêts vers 1965, et pourront atteindre la vitesse de 3.200 Km/H. Quant à leur rayon d'action, il sera pratiquement illimité. » [*Le Progrès scientifique*, 1961, n°6, p. 25].

⁴³ « Au cours des années 60, les nouvelles applications des terres rares avaient alors littéralement explosé par rapport aux quelques applications que l'on trouvait jusque-là. L'US Air Force avait eu l'idée saugrenue de développer un avion à propulsion nucléaire ! (nous l'ignorions à l'époque). Pour ce faire, ils avaient produit de

séparation, purification – des terres rares étant amorti par les télévisions couleur, les terres rares sont alors plus largement employées pour d'autres applications : pots catalytiques ou applications optiques dans lesquelles Rhône-Poulenc (devenu Rhodia) reste l'un des leaders mondiaux.⁴⁴ La propriété (optique, magnétique, catalytique) constitue dans ce cas-là une condition nécessaire de l'application. On pourra alors parler de propriété-application.

IV.2.2.2. Implications en recherche appliquée

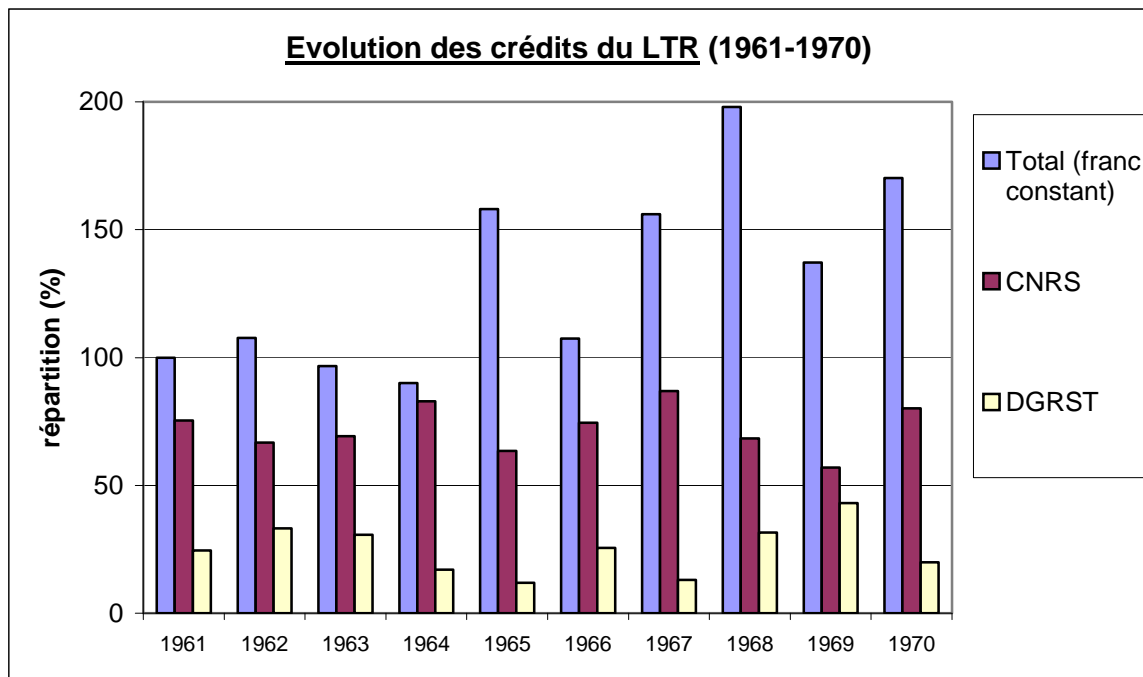
Face au renouveau des applications des terres rares dans les années soixante, le Laboratoire des terres rares n'a pas de positionnement général. Il n'agit pas comme un seul bloc mais de manière pragmatique et par section, ce qui confirme l'autonomie laissée par Trombe au sein du laboratoire. En participant à la Commission des hautes températures, le Laboratoire a développé une forte thématique sur les oxydes de terres rares, aux applications réfractaires potentielles. Mais seule la section A obtient vraiment des financements ciblés, en provenance des organismes publics d'ailleurs : une action concertée de la DGRST sur la « conversion des énergies » (1961-1966), puis sur les « chalcogénures » de terres rares en raison de leurs éventuelles propriétés semi-conductrices (1966-1970) et un contrat avec le CEA (1967). C'est qu'en raison du manque de moyens matériels, le LTR peut difficilement rivaliser avec les riches laboratoires industriels occupés par la course aux applications optiques des terres comme « General Electric, RCA, Bell Telephone, Philips, Westinghouse, Dupont de Nemours, etc. »⁴⁵ Au cours des années 1960, Trombe dépose quelques brevets sur la séparation des terres rares [RA CNRS, 1966]. Quand il en a l'occasion, le Laboratoire saisit les modes qui mettent les terres rares à l'honneur. Ainsi, il prend part à deux RCP du CNRS dès 1963.⁴⁶ L'ensemble des crédits contractuels de la section A (DGRST, CNRS, CEA) peuvent éventuellement être redistribués vers les autres sections. Leur apport est loin d'être négligeable au cours des années 1960. Le diagramme ci-dessous en donne une représentation plus visuelle. Il suit l'évolution de deux indices : le total des crédits du laboratoire (hors salaires) à franc constant (sur la base du franc en 1961) et la répartition relative des crédits CNRS (fonctionnement et équipement notamment) par rapport aux contrats DGRST (la somme des deux vaut cent sauf en 1965) [RA LTR, 1967, p. 52 ; 1970, p. 40].

grandes quantités d'yttrium. Lorsqu'il est apparu que le projet était absurde et qu'il a été abandonné, ils se sont retrouvés avec de grandes quantités d'yttrium sans emploi. Or, les terres rares ont des propriétés optiques intéressantes. L'yttrium fut employé pour faire le rouge des TV cathodiques en couleur. Le luminophore en question est un oxysulfure d'yttrium dopé à l'euporium. C'est Rhône Poulenc qui a développé la séparation des terres rares pour cette application dans le monde entier. D'autres applications ont alors envahi le marché, des pots de catalyse jusqu'aux lasers. » [I Caro, 2005, p. 3].

⁴⁴ « on est fabricant de terres rares [...] magnétisme, applications à la luminescence, biomédical... il y aura toutes les applications des terres rares. – PT : On m'a dit que Rhodia avait beaucoup travaillé sur les oxydes de terres rares pour les TV couleur, non ? – PM : Oui. Chez nous, les applications de la chimie du solide sont la luminescence, que ce soit pour les TV traditionnelles (cathodiques) ou pour les écrans plasma, les lampes fluorescentes, la catalyse automobile pour les réactions solide-gaz » [I Maestro, 2007, p. 3-4].

⁴⁵ « une véritable "course de vitesse" est engagée entre les laboratoires de recherche des plus importants groupes industriels mondiaux : General Electric, RCA, Bell Telephone, Philips, Westinghouse, Dupont de Nemours, etc..., qui tous cherchent à mettre au point de nouveaux matériaux fluorescents à base d'euporium susceptibles de remplacer le vanadate YVO_4 .Eu, lancé sur le marché par General Telephone-Sylvania et dont le succès en télévision couleur fut étonnant. Le peu de moyens matériels et surtout le manque de locaux ont constitué pour le Laboratoire des terres rares du CNRS un lourd handicap dans cette compétition. » [RA LTR, 1967].

⁴⁶ Ainsi, sur la période (1963-1964), le LTR – section A uniquement – reçoit des crédits de la DGRST pour étudier les « propriétés thermo-électriques » des chalcogénures de terres rares (contrat depuis 1961, G. Collin) et participe à deux RCP, l'une sur la « séparation des terres rares sur résines anioniques par solvants mixtes (aqueux-organiques) », l'autre sur la caractérisation par « fluorescence de rayons X » [RA LTR, 1964, p. 14.4].



Première constatation : les recettes du laboratoire ne sont pas stables d'une année sur l'autre. Ces évolutions annuelles sont dues non seulement à des crédits contractuels fluctuants avec la DGRST, le CEA et la Direction des recherches et moyens d'essais (DRME) mais encore aux crédits du CNRS, eux-mêmes variables. La variation relative des crédits CNRS suit des cycles quadriennaux : 1961-1964, 1964-1967, 1967-1970. Or, quatre ans c'est aussi la durée entre deux évaluations des laboratoires du CNRS. Certains crédits sont donc probablement attribués par le CNRS tous les quatre ans. Les actions pluriannuelles du type RCP, variables, peuvent aussi expliquer les variations annuelles. Deuxièmement, la part du CNRS est majoritaire (entre 60 et 80%) dans le budget hors salaire par rapport à des apports d'autres organismes de l'État : la DGRST (1961-1970), la DRME (1965), le CEA (1967). Aucun financement n'est reçu d'entreprises privées. Troisième point : le budget total augmente, à franc constant, il est grosso modo multiplié par un et demi. Il passe de 265000 francs en 1961 (360000 euros 2006) à 650000 francs en 1970 (620000 euros 2006). La croissance des crédits répond à plusieurs enjeux imbriqués : investissement accru pour les politiques scientifiques, rôle majeur des laboratoires propres, importance nouvelle des terres rares, liée à leurs applications, reconnaissance d'une performance du laboratoire. Pourtant le laboratoire se plaint des sommes trop modiques qui lui sont allouées par le CNRS au cours de la période et prévient des difficultés que poserait l'arrêt des crédits contractuels pour la section A [RA LTR, 1967]. Le Laboratoire choisit l'indépendance vis-à-vis des financements privés mais reçoit des contrats orientés en provenance des organismes d'État à vocation industrielle (DGRST, CEA, DRME) et du CNRS par les RCP. En particulier il étudie les propriétés des terres rares, qui sont aussi celles qui intéressent l'industrie : les réfractaires pour le nucléaire, les matériaux optiques pour l'armement, mais aussi la catalyse (collaboration avec le CERCOA).

En 1967, le CNRS instaure les premiers « conseils de laboratoire » pour contrebalancer l'omnipotence du directeur, le seconder dans ses décisions et sa gestion. Ces conseils sont d'abord composés des seuls plus hauts cadres du laboratoire : directeurs et maîtres de recherche. Dans un élan de démocratisation, après le choc des « événements de

Mai », les conseils de laboratoire s'ouvrent aussi aux représentants des techniciens et chercheurs, élus pour un mandat.⁴⁷ Cette nouvelle structure stimule le déploiement d'une hiérarchie nouvelle sous le directeur. Une trentaine de chercheurs et techniciens y travaillent. Sur cette évolution générale se superpose un problème local propre à ce Laboratoire : un déséquilibre important entre une section A, densément peuplée (18 personnes) et peu encadrée, et des sections B et C, qui, quoique moins peuplées (respectivement 9 et 5 personnes), regorgent de cadres – trois maîtres et deux chargés de recherche –.⁴⁸ De plus, la section A en se consacrant à une « recherche appliquée » pose un problème de coexistence avec les deux autres, plus fondamentales. Depuis plusieurs années, le Comité directeur du laboratoire réclame une refonte structurelle et thématique. Les conseils de laboratoire, en favorisant le regroupement d'individus autour des maîtres et chargés de recherche, redessinent de nouveaux groupes qui fragilisent les sections. Les trois sections disproportionnées (A, B, C) sont finalement réorganisées entre juillet 1967 et novembre 1968 en cinq groupes de recherche (1 à 5), eux-mêmes subdivisés, et un service général (quatre administratifs et deux personnes à l'atelier). La refonte structurelle donne l'occasion de redéfinir des programmes de recherche : un groupe de « synthèse minérale de composés polycristallins et monocristallins » (2 ; 14 personnes), deux groupes tournés vers les propriétés qu'elles soient « magnétiques et physiques » (4 ; 4) ou « spectrales associées au champ cristallin » (5 ; 11), un groupe étudiant les « métaux et alliages des terres rares » (3 ; 4) et enfin un groupe orienté vers la « physico-chimie des complexes des terres rares, séparations par échanges d'ions » (1 ; 9) [RA LTR, 1967 ; 1968].⁴⁹ Trombe place Paul Caro à la tête de ce dernier groupe.

En 1969, il quitte la direction du LTR – après 24 ans à sa tête – pour se consacrer exclusivement au Laboratoire de l'énergie solaire (LES) à Montlouis (V.2). Loriers lui succède, Caro devient sous-directeur. Une équipe spécialisée dans les « couches minces » est créée, les autres équipes changent de nom. Le LTR réaffirme alors ses axes de recherche privilégiés et une polyvalence orientée non seulement vers l'« étude des propriétés fondamentales spécifiques des terres rares » et la connaissance de la « liaison chimique » mais encore vers l'utilisation de terres rares comme « sondes structurales locales sensibles à l'ordre à courte distance » ou leur application suivant les « besoins de la technologie » [RA LTR, 1972, p. 7]. Par la suite, c'est le groupe de Caro qui sera le plus visible au sein de la communauté de chimie du solide. Je choisis donc de me focaliser maintenant sur son activité afin de décrire le type de chimie qu'il développe.

IV.2.3. Mathématisation et spectroscopie en chimie du solide : le cas du groupe Caro (1955-1992)

⁴⁷ C'est Trombe qui parle : « Je voudrais dire [...] que les événements de Mai ont eu leur répercussion dans notre laboratoire et que nous en avons profité pour constituer un conseil de laboratoire plus étendu que le précédent. Le CDL fonctionne en accord avec les éléments hiérarchiques du Laboratoire. Il est efficace et nous en sommes, dans l'ensemble, satisfaits. » [RA LTR, 1969b].

⁴⁸ C'est précisément la section qui a le plus développé les contrats orientées vers les organismes de l'État et les applications – la section A « séparations et synthèses physico-chimiques » – qui a crû de manière exponentielle par rapport aux autres, dépendantes seulement des crédits CNRS.

⁴⁹ « Le premier groupe [A], comme l'avaient fait remarquer, depuis plusieurs années, la Direction du CNRS et le Comité directeur du Laboratoire, était trop important, son effectif étant égal à ceux des deuxième et troisième groupes réunis. D'autre part, le groupe de M. Loriers [A] ne comprenait qu'un chargé de recherche à mi-temps (Mme Domine) alors que, dans les groupes II et III, se trouvaient trois maîtres de recherche et un chargé de recherche. À la fin de 1967, le retour des U.S.A. de Paul Caro, maître de recherche, avait encore accentué cette disproportion. » [RA LTR, 1968, p. 1-2].

Malgré le déménagement à Bellevue, Trombe cultive toujours son pré carré à Chimie Paris où il peut recruter de bons étudiants, diplômés de l'École, ce qui est d'autant plus intéressant que le campus de Bellevue n'est pas associé à l'université parisienne. En 1955, il engage sur sa valeur athlétique un jeune ingénieur de l'École, Paul Caro, qui, fasciné par les catacombes parisiennes, accepte parce que son nouveau patron est l'un des premiers spéléologues français : une fascination réciproque et très peu scientifique en somme !⁵⁰ La thèse de Caro, qui dure près de dix ans, porte sur divers composés (alliages, halogénures...) à base d'yttrium et de scandium [RA LTR, 1958, p. 53].

IV.2.3.1. Tribulations d'un jeune Français au Far West et ses conséquences hexagonales (1965-1967)

Vers la fin de sa thèse, Caro sert d'interprète lors d'une visite de Leroy Eyring à Odeillo et profite de l'occasion pour se faire connaître du « pape des oxydes non stœchiométriques ». Celui-ci lui propose un postdoc dans son laboratoire de l'Arizona. Comme les occasions de partir sont rares au LTR, le jeune docteur saute sur l'occasion. Au cours des années 1960, les États-Unis fascinent plus que jamais les chimistes des terres rares. En Arizona, le jeune Français se familiarise avec les composés non stœchiométriques (1965-1966).⁵¹ Par la suite, il réalise le rêve de tout spécialiste des terres rares en passant une année à Ames, dans l'Iowa avec John Corbett (1966-1967). Au cours de ses deux années à l'étranger, il se familiarise avec l'étude des oxydes de terres rares, qui sont isolants électriques. Or, les isolants ne sont pas traités par la théorie des bandes, réservée aux conducteurs électriques, mais par une théorie spécifique, la « théorie du champ des ligands ». Celle-ci a d'abord été développée en chimie de coordination puis importée vers les solides, comme un savant mélange de théorie des groupes et de mécanique quantique appliquées aux solides. Ces approches très mathématiques de la chimie sont d'ailleurs déjà enseignées dans les universités lorsque le Français les découvre, éberlué. Dans le cas des lanthanides, plus complexe, ces théories ont été développées principalement aux États-Unis sous l'impulsion de « Racah, Judd, Wybourne, Ofelt... » [RA LTR, 1977, p. 6].

À son retour en France, le jeune chercheur, promu maître de recherche, prend en 1968 la direction d'un petit groupe de chimistes au sein du Laboratoire, qu'il lance sur les oxydes de terres rares. Il réinvestit les savoir-faire acquis aux États-Unis pour sensibiliser ses collègues à la chimie des isolants électroniques. En France, la mathématisation de la chimie des solides isolants est alors largement ignorée par les chimistes. En 1966, des chercheurs du Laboratoire – Blandin (section C), J.-P. Briffaut (section A) – ont déjà publié un ouvrage *Notions sur la théorie des groupes finis. Applications à la physique*, qui s'emploie à diffuser les résultats théoriques en provenance des États-Unis auprès des physiciens et chimistes

⁵⁰ « Je dois dire que j'ai été recruté non parce que j'avais des qualités intellectuelles mais parce que je paraissais suffisamment costaud pour porter des flacons de 5 litres que l'on transvasait sans cesse à la sortie des colonnes échangeuses d'ions. C'était un travail de manœuvre, en fait, la séparation des terres rares. De plus, il y a une deuxième raison, à peine avouable, qui m'attirait dans le personnage de Trombe. A l'époque, avec mes camarades de l'École de chimie, nous fréquentions beaucoup les catacombes, nous étions passionnés de spéléologie et Membres actifs du Spéleo Club de Paris. Or Trombe était l'un des grands spéléologues français. Il avait fait des explorations extraordinaires, notamment dans le Vercors. C'était pas tellement les terres rares qui m'attiraient, c'était le personnage. » [I Caro, 2002, p. 2].

⁵¹ « Mais chez Trombe, il fallait sauter sur les opportunités. Or Leroy Eyring, le pape des oxydes non stœchiométriques, était venu visiter le four solaire d'Odeillo. Durant son séjour, je lui avais servi d'interprète, il avait un poste dans son laboratoire en Arizona. » [I Caro, 2005, p. 14].

français.⁵² Les calculs mathématiques ne sont pas pur jeu de l'esprit mais ont une utilité pratique directe : ils permettent d'interpréter les spectres optiques des terres rares. La spectroscopie est l'outil rêvé pour les terres rares parce que les éléments émettent ou absorbent quasiment aux mêmes longueurs d'onde qu'ils soient sous forme d'ion libre ou imbriqués dans une matrice solide. Grosso modo, le spectre émis ou absorbé est caractéristique de chaque élément parce qu'il dépend essentiellement des électrons de la couche électronique ou orbitale atomique (4f). Or, celle-ci est peu sensible à l'environnement des atomes voisins parce que c'est orbitale de cœur, basse en énergie et géographiquement proche du noyau. La description quantique en terme d'orbitales atomiques donne aussi une explication à la similitude chimique des lanthanides. Essentiellement, ce sont les électrons de valence (extérieurs, hauts en énergie) qui sont responsables des propriétés chimiques des éléments. Quand on parcourt la période des lanthanides, c'est-à-dire quand on passe de Z à Z+1, Z étant le numéro atomique, on ajoute un électron au nuage électronique mais cet électron supplémentaire vient peupler l'orbitale (4f), orbitale de cœur, laissant inchangée la couche de valence, de type (5d)(6s). Cette tentative d'explication – simplifiée dans la mesure de mes moyens – recouvre un appareil mathématique très lourd dans le cas des terres rares. Le spectre obtenu, grâce à l'interprétation introduite par la théorie des groupes, donne des indications de symétrie de l'élément et renseigne donc sur son environnement atomique.⁵³

Dès la formation du groupe de « physico-chimie des complexes de terres rares », l'interprétation des spectres optiques (expérimentaux) constitue la base commune de son savoir-faire. Tous les chercheurs doivent se tourner vers la théorie des champs de ligands* et autres réjouissances d'un formalisme mathématique parfois lourd. À la fin des années soixante, les calculs se font consciencieusement à la main en recherchant de judicieuses simplifications dans un souci d'économiser ses forces "calculatoires". Néanmoins on ne peut éviter des calculs matriciels « 48 par 48 » à débrouiller seul, sur la feuille blanche, avec une tête et deux mains comme seules ressources pratiques.⁵⁴ La spectroscopie des terres rares est appréhendée dans une perspective de propriété-essence (IV.2.2.1). C'est le spectre lui-même qui intéresse le chercheur afin de déduire des renseignements sur les niveaux d'énergie des éléments de terres rares. Le chimiste caractérise ses composés solides par la prise de spectres puis devient théoricien – ou au moins calculateur virtuose – pour appliquer les calculs

⁵² Les recherches théoriques « ont porté sur la "théorie des groupes finis", en vue des applications à la physique et, en particulier, à la spectrométrie. [...] Depuis quelques années, la théorie des groupes permet de faire une étude rigoureuse des spectres cristallins et des spectres atomiques. Ces études, assez développés à l'étranger, ont été très peu diffusées en France. Plusieurs exposés ont été faits sur cette question et leur contenu a été développé dans un premier fascicule, édité par les Laboratoires de Bellevue. Une édition est en cours au CDU pour donner une plus large diffusion. Nous nous sommes efforcés de reprendre la question au début, de manière à ce que ces travaux puissent servir à tous ceux qui seront amenés à utiliser cette théorie au cours de leurs recherches. [Blandin J. & Briffaut J.P., 1966] » [RA LTR, 1967]

⁵³ Nous utilisons « la théorie du champ des ligands, auquel s'applique la théorie des groupes dans la mesure où la théorie des groupes permet de classer les éléments de symétrie autour d'un ion. » [p. 5]. « La nature particulière de la chose ne permet pas de la traiter comme le reste : si l'on veut comprendre l'originalité des terres rares, il faut descendre dans l'étude des configurations (f). A partir de là, vous êtes prisonniers d'un système mathématique complexe sans lequel vous ne pouvez pas comprendre ce qui se passe. Lorsque vous avez compris, ça devient un jeu extrêmement intéressant car des quantités de manipulations sont possibles du fait que dans un solide isolant – c'est aussi vrai pour les métaux mais je ne connais pas – la terre rare développe tout un jeu de niveaux d'énergie que l'on peut peupler (en électrons) sélectivement avec des lasers. » [I Caro, 2005, p. 17].

⁵⁴ « PT : En quoi consistaient vos calculs ? – EA : C'est un peu compliqué : dans un formalisme de Wybourn, on construisait au début les matrices à la main pour chaque terre rare suivant le nombre d'électrons que la terre rare possède. On utilisait beaucoup europium (Eu³⁺) parce qu'il permettait de travailler sur la configuration tronquée, le niveau (⁷F) est isolé des autres niveaux excités et on peut travailler que sur ce niveau de base pour faire le calcul. Les paramètres ainsi obtenues pouvaient être utilisés comme paramètres de départ pour d'autres terres rares (Nd, Er, par ex.) » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 2].

théoriques standard à son cas particulier.⁵⁵ Mais le travail d'investigation va plus loin : une terre rare peut servir de « sonde structurale ponctuelle ». En comparant le spectre de l'ion dans l'état libre et le spectre de l'élément lié – dans la matrice solide –, il est possible d'inférer l'environnement de la terre rare : nature des atomes voisins et type de sites occupés par la terre rare. La spectroscopie X permet ainsi d'étudier les structures microscopiques – atomiques – des solides à une échelle inférieure à celle de la diffraction des rayons X, qui ne fournit qu'une moyenne nanométrique. « C'est une technique qu'on a développée au début, puis que l'on a beaucoup exporté chez nos amis de chimie du solide un peu partout, à Rennes, à Paris, à Bordeaux, à Nantes... Nous avons donc examiné beaucoup de produits envoyés par nos collègues. » [I Caro, 2005, p. 6]. Ce savoir-faire spectroscopique se retrouve plus largement au niveau de l'ensemble du Laboratoire et pas seulement dans le groupe Caro. Extrêmement pointu, il se développe à l'intersection de la "prise" instrumentale – spectroscopie fine et travail à l'hélium liquide – et de l'interprétation théorique. Autour de 1970, le LTR représente donc un groupe de recherche à la pointe des déterminations structurales fines dans les solides des terres rares. Sur ces questions, il constitue un nœud important de la communauté française.⁵⁶

IV.2.3.2. Chimie mathématique et recherche fondamentale

Cette approche du solide est vraiment marquée par l'appareil mathématique et les théories physiques. Ainsi l'élément chimique, loin d'être envisagé par des propriétés simples (comme l'électronégativité qu'aiment bien les chimistes) est décrit à partir de la structure électronique : électrons de cœur et de valence, niveaux d'énergie, transitions spectrales... Les propriétés chimiques et physiques sont interprétées en fonction de ces considérations électroniques.⁵⁷ Comme la théorie du champ des ligands fournit des descriptions locales, appropriées aux phénomènes localisés, l'équipe Caro se concentre à la fois sur les propriétés optiques (spectroscopie) et sur les propriétés magnétiques (paramagnétisme*). En 1970, elle change de nom pour « physico-chimie structurale des composés oxygénés » [RA LTR, 1970] et s'impose bientôt comme la référence pour la chimie du solide française sur les questions de théorie du champ de ligands. Les chercheurs ne développent pas proprement dit de nouveaux modèles mais adaptent ceux qui existent à des cas particuliers. L'équipe exporte son savoir-

⁵⁵ « PT : Au sein du groupe Caro, est-ce que tous les chercheurs faisaient la même chose ? – EA : Les chercheurs étaient tous en spectroscopie mais on était plus ou moins théoricien. Michelle Faucher, par exemple, était beaucoup plus théoricienne. Nous, nous faisons les deux, appliquer les calculs à nos spectres » et tracer les spectres [I Antic-Fidancev, 2006, p. 2].

⁵⁶ Pour 1972, la « liste des laboratoires avec lesquels des collaborations sont établies » est importante en chimie minérale (faculté de pharmacie de Paris, CECM, Bordeaux) et impressionnante vers la physique du solide (Orsay, Saclay, Grenoble, Bellevue, Prague, *General Electric*) ou l'optique (Orsay, Rennes, Lyon, Paris) [RA LTR, 1972, p. 26].

⁵⁷ Un rapport du LTR décrit ainsi les éléments des terres rares et leurs propriétés : « Les raisons pour lesquelles les éléments des terres rares jouent maintenant un rôle important et si diversifié dans les sciences et les techniques, tiennent avant tout au caractère exceptionnel de leur structure électronique : le remplissage progressif de la couche électronique 4f, située assez profondément au cœur de l'atome, fournit avec les lanthanides une série unique d'éléments de transition de comportement chimique identique, ayant les propriétés de conserver dans les solides les niveaux d'énergie discrets caractéristiques des ions libres. [...] Les différents états d'énergie que peuvent prendre les électrons dans ces configurations sont à l'origine des propriétés magnétiques et spectrales des lanthanides : du niveau fondamental des configurations 4fⁿ, et de l'importance du couplage spin-orbite, dépendent les propriétés de paramagnétisme et les phénomènes d'ordre magnétique [...] ; des transitions entre niveaux, par absorption ou émission de radiations électromagnétiques, découlent les propriétés optiques, caractérisées par des spectres de raies de longueurs d'onde bien définies (pour les niveaux 4f), et par des phénomènes dynamiques importants (interactions rayonnement-matière, transferts d'énergie). » [RA LTR, 1972, p. 4].

faire auprès des laboratoires français – de physique et de chimie – intéressés par ces problèmes bien au delà des terres rares.⁵⁸ Suivant l'effort de vulgarisation de Blandin et Breffaut, Caro tente d'enseigner la mathématisation de la chimie à Jussieu, à Orsay mais les étudiants ne se montrent que « poliment » intéressés [I Caro, 2005, p. 17]. En 1976, il publie un ouvrage afin de sensibiliser les chimistes à la *Structure électronique des éléments de transition. L'atome dans le cristal* [Caro, 1976].

En une vingtaine d'années (1955-1975), la transition vers la chimie mathématique a spécialisé à outrance. S'il était courant, vers 1960, au Laboratoire, de travailler simultanément sur les métaux et oxydes de terres rares, ceci devient impossible au milieu des années 1970. C'est que la synthèse, l'étude structurale et l'interprétation des spectres sont devenues indissociables d'une modélisation théorique approfondie. Or, les isolants (oxydes) et les conducteurs électriques (métaux) requièrent des approches différentes, les uns sont traités par la théorie des groupes, les autres par la théorie des bandes. Métaux et oxydes de terres rares appellent des formalismes disjoints, incompatibles, trop éloignés pour que des expérimentateurs les maîtrisent simultanément, au plus haut niveau. Au sein du LTR, certains groupes ne se comprennent plus.⁵⁹ La formation universitaire des chimistes n'est pas assez poussée en mathématique et ce n'est qu'arrivé au laboratoire que le thésard se frotte à la chimie mathématique. La recherche y est trop originale – et marginale par rapport aux canons de la chimie du solide – qu'elle implique un « autodidactisme » permanent [I Caro, 2005, p. 6].

Caro revendique une recherche fondamentale. De plus, les oxydes de terres rares orientent vers des phénomènes locaux, qu'ils soient électriques ou magnétiques. Suite à cette double position, « l'axe de recherche » principal de l'équipe au cours des années 1970 est « la connaissance des propriétés locales de l'atome de transition dans la structure cristalline ». Son objectif n'est pas de « découvrir des propriétés ou des performances spécifiques ou d'optimiser des fabrications » mais de chercher « à comprendre la relation fondamentale entre le lanthanide et son environnement, c'est-à-dire la relation entre la propriété et la structure locale » [RA LTR, 1980, p. 5, 15]. Choisir d'étudier des phénomènes locaux puis de chercher à les relier à la structure induit une conséquence instrumentale directe : être capable de déterminer la structure atomique des solides, c'est-à-dire « voir » entre un et quelques angströms. Or, la diffraction des rayons X ne suffit pas parce qu'elle interagit avec des plans d'atomes. D'abord tournée vers la voie spectroscopique – historique au laboratoire (IV.2.1) –, l'équipe se utilise ensuite de « puissantes nouvelles méthodes d'investigation » : la résonance paramagnétique électronique (RPE) et surtout la microscopie électronique (ME). En microscopie électronique, un appareil « ordinaire » a été acheté vers 1970, c'est-à-dire très tôt par rapport aux autres laboratoires français de chimie du solide. Il permet d'atteindre une précision entre deux et trois angströms. La microscopie électronique nécessite le recours à des échantillons en « couches minces », qui sont fabriqués au sein même du LTR dans l'équipe des couches

⁵⁸ « Nous avons été amené à faire, parfois, de véritables transferts de technologie (de know-how si on veut), au bénéfice des laboratoires de nos collègues, principalement dans le domaine de l'interprétation théorique des résultats expérimentaux, et plus précisément au niveau pratique de la mise sur ordinateur des méthodes de traitements de données (qui exigent d'ailleurs, pour le problème le plus simple, une capacité de mémoire de l'ordre de 500 K). » [RA LTR, 1977, p. 9]

⁵⁹ « Non, je n'utilisais pas la théorie des bandes pour étudier les isolants des oxydes de terre rare. C'est plutôt mon collègue Achard parce qu'il étudiait les milieux métalliques, qui ne sont pas décrits de la même manière que les isolants. On a vu diverger l'approche isolant et l'approche métallique du point de vue mathématique. Le problème est le même mais les descriptions mathématiques sont radicalement différentes. Je ne sais même pas si elles sont réconciliables, toutes les deux sont extrêmement trapues, elles doivent l'être quelque part mais ce n'est pas certain. Il y a un champ des ligands dans l'isolant et un champ des ligands dans le métal. Je n'ai jamais compris ce que disaient les gens du champ des ligands du métal. Je suppose que la réciproque est vraie. [...] Au début, quand j'ai commencé, on pouvait penser maîtriser tous les aspects des terres rares, aussi bien les métalliques que les autres. A partir des années 1975, ce n'était plus possible du tout. » [I Caro, 2005, p. 16].

minces, créée en 1970 et dirigée par Henry La Blanchetais. À l'extérieur du LTR aussi, l'équipe Caro a su développer des collaborations avec des physiciens à Orsay, à l'Institut français du pétrole (IFP), qui lui permet un accès privilégié à un microscope plus récent : le *Scanning Transmission Electron Microscope* (STEM). La gestion collective entreprise par les laboratoires de Bellevue (ALB) facilite aussi l'accès des chimistes à divers microscopes et sondes performantes.⁶⁰ Même si le groupe est entièrement composé de chimistes, l'originalité chimique reste « accessoire » par rapport aux études structurales et aux calculs théoriques.⁶¹ Disposer d'appareils puissants ne suffit pas : le résultat expérimental obtenu n'est pas une photographie de la structure mais doit être interprété. Interpréter signifie traiter les mesures par des calculs, recalculer l'image à partir des mesures expérimentales, ce qui permettra de « voir » quelque chose qui ressemble à une structure. Il suffit donc de calculer beaucoup et de croire un peu pour « voir » dans l'image finale la structure atomique du composé solide.⁶² Comme les résultats expérimentaux sont théoriquement reconstruits, un garde-fou consiste à confronter au maximum les informations obtenues par diverses méthodes, plus ou moins indépendantes (VI.2.1.2) : spectroscopie et microscopie électronique par exemple.⁶³

Entre-temps, le Laboratoire des terres rares a prodigieusement grossi. En huit ans seulement, de 1967 à 1975, sa taille a doublé, passant de trente-deux permanents à soixante-quatre avec une dizaine de thésards [RA LTR, 1975, p. 2]. Les équipes, au nombre de sept, se sont orientées dans des directions différentes – fondamental ou appliqué, isolant ou conducteur, volume ou surface – et ne conservent qu'un petit dénominateur commun « élémentaire » : les terres rares. En 1977, le LTR subit une scission (VI.3.1.2). Le groupe Caro devient alors une équipe de recherche associée au CNRS sous l'appellation « Éléments de transition dans les solides » [RA LTR, 1977, p. 5]. Au delà de la volatilité des appellations successives : « physico-chimie des complexes » (1968-1970), « physico-chimie structurale des composés oxygénés » (1970-1977), « éléments de transition » (1977-1992), le groupe ne cesse d'étudier le domaine des oxydes de terres rares. Si l'orientation initiale est extrêmement contingente – choix de la thèse de Caro (par Trombe), travail du thésard sur les carbonates,

⁶⁰ « Notre microscope électronique JEM 100 C déjà ancien [c'est moi qui souligne] a été l'un des premiers appareils de ce type en service en France. Il est maintenant équipé d'une platine goniométrique haute résolution et de pièces polaires ultra haute résolution. Il atteint les limites de résolution des appareils de ce type [2 à 3Å]. D'autre part nous avons accès au STEM (HB5) récemment acquis par l'Institut Français du Pétrole (auprès duquel nous avons délégué un chercheur [Hervé Dexpert]), et nous participons au projet STEM d'Orsay (C. Colliex). Dans le cadre de Bellevue, nous avons, grâce à l'[association des laboratoires de Bellevue (ALB)], accès à un microscope à balayage Cameca, à une microsonde Camebax et à un analyseur ionique. » [RA LTR, 1977, p. 6].

⁶¹ « Le laboratoire Caro avait un groupe de microscopie électronique pour la caractérisation avec Schiffmacher et Hervé Dexpert, qui est ensuite parti à Toulouse où il doit être directeur d'un laboratoire. Ensuite, il y avait la spectroscopie de terres rares plus les calculs. La synthèse était accessoire. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 5] puis, « Nous étions uniquement des chimistes mais nous apprenions beaucoup, certains chimistes sont devenus très forts : Michelle Fauchet par exemple était chimiste au départ mais elle est devenue une spécialiste hors pair des mathématiques au contact des besoins d'apprentissage des théories. » [I Caro, 2005, p. 11].

⁶² « en microscopie électronique, il y avait aussi un autre problème : pour croire les images expérimentales, il faut les recalculer pour des raisons d'optique électronique. Comme l'image change tout le temps, il faut recalculer l'image et ses variations, et pour y parvenir il fallait faire un très gros effort de mathématique, qui a été fait dans mon laboratoire par Gérard Schiffmacher notamment. Les physiciens étaient plus doués pour ça que ne l'étaient les chimistes. » [I Caro, 2005, p. 8].

⁶³ « Pour pratiquer avec succès la [ME] ou la spectroscopie, il ne suffit pas de disposer des appareils de pointe nécessaires, il faut encore saisir les concepts qui permettent d'interpréter les résultats sérieusement et profondément. [...] Pour interpréter nos résultats optiques nous avons testé les théories existantes [...] sur des matériaux simples ne présentant pas de problèmes structuraux critiques (oxydes, fluorures par exemple), ceci dans le but de simuler par le calcul, à partir de la structure, leurs propriétés physiques mesurables. » [RA LTR, 1977, p. 6].

post-doctorat sur des oxydes –,⁶⁴ sa longévité par la suite peut être vue comme un choix stratégique de développement : mise à profit d'une mathématisation peu développée en France ; contournement des chalcogénures de terres rares, largement défrichées par un laboratoire allié (celui de Flahaut) depuis les années 1950 ; éloignement des propriétés les plus en vue (effets laser, ferromagnétisme)...

L'évolution des statuts de l'équipe ne remet pas non plus en cause une autre orientation constante du groupe : l'intérêt pour le théorique. Grâce à une dynamique instrumentale – spectroscopie et calculs de structure – et aux évolutions des outils informatiques, Caro et son groupe commencent à simuler les propriétés physiques des solides étudiés. Ils ne développent pas de nouvelles simulations ou théories mais appliquent celles qui existent à leurs cas particuliers. Une phase de rodage est nécessaire. En effet, les calculs sont d'abord expérimentés sur des composés connus, de structures simples afin de 1°) simuler leurs propriétés physiques à partir de leur structure électronique, puis 2°) d'effectuer la mesure d'une grandeur physique, appelé paramètre « phénoménologique » ; 3°) de comparer les paramètres « phénoménologiques » aux paramètres calculés dans le cadre de la simulation ; et enfin 4°) d'évaluer si le désaccord est acceptable. Ensuite seulement, après s'être assurée que la procédure de calcul utilisée – programmes de calcul et théories – est au point, l'équipe passe à l'étude des structures plus complexes pour lesquelles les techniques nouvelles ont été rendues indispensables et ont *de facto* été achetées.

C'est surtout à partir des années 1980 que les calculs mathématiques servent à modéliser les solides. En effet, le calcul est si compliqué qu'il ne peut être mené sans la puissance de l'informatique, qui se développe fortement au cours des années 1980 et 1990.⁶⁵ L'informatique améliore certes les simulations, de plus en plus complexes : dans le cadre de l'ATP « CRAY-1 », l'équipe essaie de calculer des « densités électroniques par des calculs de type Hartree-Fock » (1980) mais permet aussi la numérisation des données expérimentales et l'automatisation des mesures [RA LTR, 1980, p. 17-18]. Il devient ainsi possible de simuler les propriétés physiques – optiques et magnétiques – puis de comparer les constantes physiques calculées à celles qui peuvent être mesurées. Cet exercice d'une part permet d'affiner les modèles en proposant une valeur approchée des constantes inconnues et d'autre part – mais de manière très approximative – de subodorer une propriété physique à partir de la connaissance de la structure atomique ou électronique. L'équipe Caro se spécialise dans la « simulation » des propriétés paramagnétiques, ce qui n'intéresse pas vraiment les physiciens, plus occupés par les propriétés ferromagnétiques.⁶⁶ Les échanges théoriques entre le groupe et les physiciens du solide ne sont donc pas très développés. En 1984, l'équipe se réclame explicitement d'un triptyque « théorie-simulation-expérience » [RA LTR, 1984, p. 6]. Ce faisant, elle s'appuie largement sur les moyens informatiques nouveaux et milite pour que « "l'invasion" de la chimie du solide moderne par les méthodes informatiques [soit] la voie

⁶⁴ « En fait avec le recul actuel, je dirais que je suis beaucoup resté dans la même zone d'étude, presque sur un sujet unique. J'ai commencé à étudier les carbonates qui mènent aux oxydes puis je suis resté sur les mêmes matériaux [...] il s'agissait toujours des oxydes de terres rares. » [I Caro, 2005, p. 15].

⁶⁵ « PT : A quel moment êtes-vous venus à la simulation ? – PC : Durant les années 1980, ça a suivi la puissance des ordinateurs. A partir du moment où on a eu des ordinateurs plus puissants, on a pu simuler pas mal de choses. Nous, notre grande affaire, c'était la simulation des propriétés paramagnétiques des lanthanides dans les solides. » [I Caro, 2005, p. 7-8]. « j'utilisais ça [l'informatique] comme outil. Mais je peux dire que ça a fait un bond rapidement avec l'amélioration des ordinateurs vers 1990 et après [...] ça continue puisqu'on diminue le temps de calcul. Avant on faisait des matrices 48 par 48, construite à la main, aujourd'hui on fait des matrices 3000 par 3000, en introduisant tout dans l'ordinateur. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 2]

⁶⁶ « PC : Je travaillais sur des éléments paramagnétiques et ça n'intéresse vraiment pas la physique du solide. – PT : Ils s'intéressaient plus aux ferromagnétiques alors ? – PC : Oui, c'est ça, les ferro, les ferri, les antiferro, ... Je ne faisais pas du tout cela » [I Caro, 2005, p. 21].

nécessaire pour les progrès dans cette discipline » [à la manière de ce qui s'est passé pour] la chimie moléculaire. »

IV.2.3.3. Réorientations des années 1980 entre organique et biologique.

Outre ces invariants épistémologiques, l'équipe Caro opère une double ouverture au cours des années 1980 : vers les composés solides organiques d'une part et d'autre part vers les sciences du vivant et de la terre. Dans le cas organique, il s'agit plus d'un « intérêt de veille » en particulier pour les « phtalocyanines, qui semblent prometteurs pour des processus électrochromiques ». Néanmoins cet intérêt s'accompagne de collaborations (électrochimie ou autre) [RA LTR, 1982, p. 23]. A posteriori, Caro analyse cette ouverture comme un échec et souligne l'existence de possibilités qui n'ont été exploitées ni par son groupe, ni ailleurs.⁶⁷ Le groupe développe aussi des contacts avec les sciences de la terre où les terres rares peuvent servir de référence optique. Il mène des collaborations sur la spectroscopie de certains milieux vitreux (« vivianites », « chromites », « scheelites »). Un programme interdisciplinaire, le PIRPSEV, soutient une collaboration impliquant l'équipe dans l'étude « matériaux volcaniques notamment les silicates liquides. » [RA LTR, 1982, p. 24]. Mais c'est surtout pour les sciences du vivant que les échanges sont les plus fructueux, surtout à partir de la deuxième moitié des années 1980. Le groupe a développé une « technique de fibre optique* [...] pour les sondes de température [...] dans les milieux biologiques ». De manière générale, pour les protéines – comme dans le cas des solides –, les terres rares peuvent servir soit de « marqueur optique », soit de « sonde ponctuelle » (structure à courte distance) [RA LTR, 1988, p. 24]. Suite à l'essor des sciences du vivant, ces techniques permettant de sonder les tissus et membranes ont le vent en poupe. Caro en profite pour organiser en 1988 le premier congrès des terres rares en « chimie biologique » en Corse.⁶⁸ Inséré dans la « matière molle », les propriétés optiques ou magnétiques des éléments des terres vont pouvoir sonder leur environnement (information locale) ou agir sur lui (action locale).

En conclusion, le Laboratoire des terres rares offre l'exemple typique d'un programme de recherche se focalisant sur une famille élémentaire, les terres rares, non seulement comme métaux et alliages mais aussi sous forme d'oxydes. Le congrès international qu'il co-organise avec Néel et Bertaut en 1969 est à ce titre-là le point d'orgue dans l'affirmation d'une unité des composés solides des terres rares. Le double souci – métallique, oxyde – le rapproche du Centre d'étude de chimie métallurgique (CECM), qui pratique la même dualité autour des éléments de transition. Cependant, les propriétés électroniques particulières des terres rares

⁶⁷ « L'un de mes échecs est de n'avoir pas développé les terres rares dans les composés organiques par exemple. J'avais confié ça à un type qui n'était pas très doué donc ça n'a pas marché. Pourtant je reste persuadé qu'il y a des études fantastiques à faire et simples. Ce n'est toujours pas fait, c'est un vaste domaine. » [I Caro, 2005, p. 17].

⁶⁸ « L'importance des terres rares en biologie est due à l'aspect optique qui permet de réaliser des sondes. J'avais organisé, en Corse, en 1988, le 1^{er} colloque sur les lanthanides dans la chimie biologique. On commençait à voir des applications en biologie dans les domaines de la structure des protéines, de l'attaque des tumeurs, de la RMN bien sûr puisque les propriétés paramagnétiques des terres rares permettaient d'augmenter le contraste, c'est toujours utilisé en médecine, notamment le gadolinium. C'était les premières applications très importantes qui émergeaient, il y avait des problèmes de structures : par exemple, les terres rares qui ont des propriétés optiques remplacent dans les cellules le calcium qui n'en a pas. Ainsi on obtient des observations locales sur ce qui arrive au calcium. Maintenant, l'utilisation des terres rares en biologie est devenue une science en elle-même avec une explosion de sondes aux terres rares qui sont utilisées dans la médecine courante. Il y a une explosion de différents sujets, on essayait de couvrir tout le front mais ce n'était pas possible. » [I Caro, 2005, p. 16-17].

poussent le Laboratoire à se spécialiser dans leur étude spectroscopique fine. La spectroscopie, en devenant la technique numéro un du Laboratoire, implique une mathématisation importante de la chimie par la théorie des groupes. Traitements théoriques et prises de spectres deviennent les deux activités imbriquées pour ces chimistes qui doivent devenir des calculateurs (matriciels). Contrairement au rêve d'unification épistémologique de l'oxyde au métal, la « chimie métallurgique », qui anime la *Chaudronnerie*, le Laboratoire des terres rares procède à des spécialisations fortes au sein de ses équipes. Jusqu'en 1968, Trombe, personnage fascinant et haut en couleur, parvient à faire coexister les différents intérêts au sein d'une structure souple.⁶⁹ L'intérêt pour les hautes températures sert de ciment aux débuts du Laboratoire puis les objectifs et collaborations se diversifient énormément d'un groupe à l'autre : du fondamental intéressant des physiciens jusqu'à de l'appliqué touchant les industriels, de la synthèse à la théorie. Le Comité directeur du laboratoire offre d'ailleurs un amalgame singulier d'industriels privés ou publics siégeant avec des universitaires minéralistes, métallurgistes ou physiciens.⁷⁰ Cependant, au cours des années 1970, la complexité de la théorie provoque des ruptures linguistiques et méthodologiques entre ceux qui étudient les oxydes isolants et ceux qui travaillent sur les métaux conducteurs. Ce grand écart méthodologique, associé au départ de Trombe (1968) et aux tensions subséquentes entre ses anciens lieutenants, conduit à un éclatement du Laboratoire en 1977, entre trois entités : synthèse (Loriers), métaux (Jean-Claude Achard), oxydes (Caro). En conservant sa seule unité « élémentaire », le LTR a poussé à l'extrême la logique de l'individuation des substances étudiées (de l'isolant au métal, de la couche mince au solide, de la surface au volume) tout en favorisant l'affirmation de fortes personnalités individuelles parmi les chefs de groupe.

Depuis la fin des années 1960, suivant une science états-unienne florissante, le groupe Caro s'est spécialisé dans l'étude des propriétés paramagnétiques et optiques des oxydes de terres rares. Refusant autant que faire se peut la dérive des applications, le point de vue se réclame du fondamental et cherche à lier les structures atomiques locales aux propriétés physiques locales via une mathématisation de très haut niveau. Modélisation, expérimentation et quantification vont de pair. Les années 1980 marquent un accroissement des capacités de modélisation et d'automatisation grâce aux progrès informatiques qui sont alors réalisés. Elles voient une double ouverture de l'équipe vers les composés organiques solides (plus ou moins ratée) et vers les sciences de la terre et du vivant (réussie, ce qui conduit à un large domaine d'étude des sondes de terres rares en « chimie biologique »). Tout au long de la période (1968-1992), ce groupe de chimistes collabore avec d'autres laboratoires de chimie du solide ou de physique pour qui il représente une véritable mine de savoir-faire. En effet, pour les calculs théoriques et les interprétations de spectres optiques, il constitue une référence au niveau national. Il poussera d'ailleurs son avantage mathématique en pratiquant et maîtrisant très tôt (1970) une nouvelle technique pour les chimistes : la microscopie électronique. Ces ouvertures sur l'extérieur et la compétence en chimie mathématique permettent à l'équipe de collaborer efficacement avec les laboratoires français et étrangers.⁷¹

⁶⁹ « Il [Trombe] était un très mauvais professeur, il bafouillait tout le temps. Mais c'était un gentilhomme, excellent cavalier, grand sportif, grande allure. Il avait un côté gascon, un côté *condottiere*. » [I Caro, 2002, p. 2].

⁷⁰ En 1968, le Comité associe quasiment à parité des industriels et des universitaires, la composition des membres externes est la suivante : Allard (directeur général de l'IRSID), Bénard, Brocart (directeur R&D des Établissements Kuhlmann), Chrétien, Crussard (directeur scientifique Pechiney) [à qui Lacombe a succédé à la direction du laboratoire de métallurgie des Mines de Paris], Lacombe, Michel, de Rohden (ingénieur conseil de Pechiney), Souchay (professeur de chimie minérale à la faculté des sciences de Paris) [RA LTR, 1968].

⁷¹ En fin de parcours (1988), les publications du groupe sont réparties par tiers : un tiers en interne (membres seuls), un tiers en collaboration avec des Français, un tiers avec l'étranger. Pour ceux-ci, « notre premier partenaire est la Belgique (Katholieke Universiteit Leuven, Rijksuniversitair Centrum Antwerpen), puis viennent les États-Unis (Arizona State University, University of Virginia, Argonne National Laboratory), la Grande-

En 1992, alors que Caro l'a quittée depuis trois ans, l'équipe perd son statut associé au CNRS et doit se raccrocher temporairement (1993-1998) au Laboratoire Achard, alors dirigé par Annick Percheron, présidente de la section 14 « Physico-chimie des matériaux » (III.4). En 1998, l'ancienne équipe Caro vient rejoindre le Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide (LCAES), dirigé par Daniel Vivien à l'École de chimie de Paris.⁷² Ce laboratoire n'est autre que celui fondé par Collongues au début des années 1970. Quand les anciens du groupe Caro sont intégrés au LCAES, ils perçoivent des différences entre ce qui se fait ici et ce qu'ils faisaient là-bas. Pour essayer de saisir quelques différences, je vais maintenant me tourner vers lui qui est aussi le troisième laboratoire-type. Malgré les efforts pour promouvoir un dogme communautaire (III.2.), la méthode varie d'un laboratoire de chimie du solide à l'autre.

IV.3. Du CECM au Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide ou le type « instrumental-historique » (1954-1980)

L'histoire du laboratoire Collongues a été esquissée dans un mémoire de DEA [Teissier, 2004]. Je m'efforce ici de remettre en perspective ce cas particulier dans le contexte national de la chimie du solide en décrivant sa valeur archétypale au sein de la typologie adoptée. Pour ce faire je m'appuierai largement sur les données rassemblées lors du DEA et sur l'article qui le résume [Teissier, 2006].

Nous avons laissé Robert Collongues en 1954 quand, jeune docteur ès sciences physiques, il entamait sa brillante carrière universitaire (III.1.3.). Après sa thèse, Chaudron va le mettre à la tête d'un service du CECM, qui va se développer autour des réfractaires à Vitry-sur-Seine.

IV.3.1. Des polycristaux* à la cristallogénèse, entre réfractaires et fours à haute température (1954-1972)

IV.3.1.1. Premier cycle des réfractaires (1954-1962) : formation d'une école de recherche

Pendant sa thèse d'État (1947-1954), Collongues approfondit une idée force de la *Chaudronnerie* : la relation entre structure et propriétés pour les composés non stœchiométriques. Que ce soit au colloque international de Paris ou à la tribune de la Société chimique de France, Chaudron et Bénard ont montré un vif intérêt et développer des idées claires sur cette question, avant même 1950 (III.4.1). Au cours de la thèse, les qualités scientifiques et la prestance de Collongues ont convaincu le maître. Sitôt docteur, le jeune chercheur se voit confier la responsabilité d'un nouveau « service » du CECM dédié aux oxydes métalliques. Les propriétés réfractaires des oxydes en particulier intéressent grandement les industriels aéronautique et nucléaire. Chaudron est lui-même expert

Bretagne (Cavendish Laboratory Cambridge), le Brésil (Universidade Federale do Pernambuco), la Finlande, le Maroc, la Tunisie, la Pologne, la Chine, la Suisse, l'Espagne, le Canada. » [RA LTR, 1988, p. 31].

⁷² « A partir de 1993, nous avons fait partie du Laboratoire de Chimie Métallurgique et Spectroscopie des Terres Rares, qui était au départ le Laboratoire de Métallurgie dirigé par Achard. En 1998, le groupe de métallurgie a été déplacé à Thiais dans un centre prévu pour eux mais nous avons décidé de venir ici parce que le groupe de Vivien faisait de spectroscopie comme nous. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 5].

scientifique auprès du CEA. En 1953, dans son programme nucléaire – officiellement – civil, le CEA a lancé un vaste projet d'étude de la « zirconite » (ZrO_2). Et justement, le service de Collongues a été sélectionné pour étudier puis stabiliser la zirconite. Profitant de l'aubaine offerte par les investissements publics, il se spécialise rapidement sur les composés résistants aux hautes températures. Ainsi s'ouvre le premier cycle de recherche sur les (super)réfractaires (1954-1962) mené en partenariat étroit avec le CEA. Durant près de quinze ans, l'organisme nucléaire public est le principal soutien financier du service (hors salaire CNRS) puisqu'il subventionne plusieurs thèses sur la zirconite et finance l'achat de matériels. L'équipe devient le « service des hautes températures » du CECM. C'est donc à la confluence de la chimie métallurgique du CECM, des hautes températures du CNRS et du programme nucléaire français que se situe le programme de recherche du service Collongues. Par sa triple implication dans chacune de ces institutions (CECM, CNRS, CEA), Chaudron joue un rôle capital dans la genèse du projet.

La zirconite possède un point de fusion à $2700^\circ C$, bien plus élevé que celui des oxydes de fer, ce qui en fait potentiellement un super-réfractaire très intéressant. Cependant, elle présente aussi une « transformation allotropique » gênante à $1050^\circ C$. Cette transformation quadratique \leftrightarrow monoclinique est catastrophique même puisqu'elle modifie brutalement le volume de la zirconite. Par conséquent, chaque fois que la zirconite est portée (ou refroidie) à $1050^\circ C$, le solide se brise ou éclate, ce qui la rend inutilisable comme matériau réfractaire. Plusieurs thèses sont donc menées à partir de celle de Stöcker [1960] pour comprendre puis résoudre le problème.⁷³ À partir de considérations « cristallographiques » liées à la position du zirconium tétravalent dans la zirconite (ZrO_2), l'équipe recherche une stabilisation par insertion d'« ion stabilisant » de valence moindre que le zirconium, divalent (M) ou trivalent (M'). Pour ce faire, les chimistes mélangent des poudres d'oxydes métalliques et de zirconite dans des proportions non stœchiométriques avant de les faire réagir par chauffage. Les solides obtenus sont des « solutions solides lacunaires », notées : $Zr_{1-x}^{IV}M_x^{II}O_{2-xx}$ ou $Zr_{1-x}^{IV}M'_x{}^{III}O_{2-x/2x/2}$ (étant une lacune). Le recours à ces notations caractérise une approche « thermodynamique » de la non-stœchiométrie avec un formalisme de type Wagner et Schottky, datant de la physique des années trente. La non stœchiométrie est interprétée non pas en termes structuraux, de micro-domaines de structures différentes, mais de manière macroscopique suivant une composition unique, équilibrée. L'introduction des éléments stabilisants dans la structure de la zirconite ne supprime pas la transition allotropique mais modifie la température à laquelle elle se produit. Plus cette température est basse, plus le système est stabilisé. Après une étude systématique, Collongues et ses étudiants montrent qu'une substitution à la chaux est acceptable dans la plupart des cas mais que la meilleure stabilisation est obtenue avec les terres rares.⁷⁴

⁷³ « la stabilisation de la zirconite, un matériau qui a d'excellentes propriétés réfractaires, hors normes même. Mais la zirconite avait l'inconvénient de présenter un changement de phase, un changement de volume dramatique, vers $1050^\circ C$. Donc, chaque fois qu'il passait la barre des $1050^\circ C$, en chauffant ou en refroidissant, le matériau éclatait. En fait, au laboratoire, deux, trois thèses successives, ont permis de montrer pourquoi, puis comment y remédier. Nous avons montré que la stabilisation de la zirconite donnait un matériau qui avait les mêmes propriétés réfractaires qu'avant mais ne cassait plus et pouvait être utilisé parfaitement. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 2].

⁷⁴ Près de vingt ans plus tard, Collongues explique ainsi la démarche suivie : « En examinant les caractéristiques cristallographiques des oxydes MO_2 , nous avons remarqué la position très particulière de la zirconite à la limite entre la structure rutile TiO_2 (coordination de cation : 6) et la structure fluorite (coordination de cation : 8). La dimension trop faible de l'ion Zr^{4+} entraîne une déformation de cette structure par suite des répulsions entre ions O^{2-} . La création de lacunes dans le sous-réseau oxygène pourrait diminuer ces distorsions. C'est bien ce qui a été constaté. La zirconite forme, avec les oxydes MO et M'_2O_3 d'éléments bi ou trivalents des solutions solides cubiques lacunaires dans lesquelles les distances O-O retrouvent leurs valeurs normales. La formule de ces solutions solides est : $Zr_{1-x}^{IV}M_x^{II}O_{2-xx}$ ou $Zr_{1-x}^{IV}M'_x{}^{III}O_{2-x/2x/2}$ (= lacune). *La zirconite cubique ne peut donc être*

Puisque les températures de fusion augmentent, parfois au-delà de 2500°C, le groupe doit accroître la capacité de ses fours. Ici, comme à Commission CNRS, ce sont les propriétés thermiques qui sont au cœur du programme de recherche. Néanmoins, d'autres propriétés physiques peuvent être investiguées de manière non systématique : mesures de conductivité électrique en particulier. Parallèlement à la zircone, une autre partie du groupe poursuit l'étude des oxydes de fer et des ferrites. Les salaires sont fournis en majorité par le CNRS, les doctorants sont soit payés comme attachés de recherche, soit embauchés comme ITA. Ils sont ensuite assez facilement titularisés comme chercheurs au CNRS. Le recrutement des étudiants pourrait poser problème dans la mesure où à Vitry-sur-Seine comme à Bellevue l'université parisienne est lointaine. Au cours des années 1950, c'est encore Chaudron qui y travaille : physiquement présent à la Sorbonne, à l'École de chimie de Paris et visible ailleurs par procuration (II.2) Bien qu'il ne soit pas un professeur « très ordonné », les étudiants sont attirés par le « personnage » qui sait au besoin se montrer persuasif. La première génération d'élèves de Collongues a suivi les cours du maître soit à la Sorbonne (Monique Perez y Jorba), soit à l'École de chimie (Jeanine Théry). On recrute aussi bien des ingénieurs que des universitaires, autant de filles que de garçons. En effet, trois des six premiers thésards de Collongues sont des femmes (1954-1964), ce qui est assez exceptionnel pour l'époque. La photographie ci-dessous témoigne de cette concentration féminine autour de Collongues, situation exceptionnelle durant les années 1950. À tel point qu'on avait l'habitude de plaisanter sur Collongues et ses six « maîtresses de recherches » :

stabilisée que sous forme de solution solide lacunaire, c'est-à-dire par des oxydes d'éléments de valence inférieure. Restait à choisir par ces oxydes les meilleurs stabilisants. L'étude des diagrammes d'équilibre a révélé que toutes ces solutions solides se décomposaient au-dessous d'une certaine température par réaction eutectoïde. C'est donc la valeur de la température qui déterminera l'intérêt pratique du stabilisant : plus cette température sera basse, plus la stabilisation sera efficace. Les résultats ont été les suivants :

Ion stabilisant	Température eutectoïde	Conclusion
Al ³⁺ , Fe ³⁺ , Ni ²⁺ , Zn ²⁺	> 1800°C	sans intérêt
Mg ²⁺	1350°C	stabilisation imparfaite
Mn ²⁺	1180°C	stabilisation efficace mais réactivité chimique accrue
Ca ²⁺	~600°C	stabilisation pratiquement totale, la réaction de décomposition étant extrêmement lente au-dessous de 600°C
Ln ³⁺ (oxydes des lanthanides sauf La ³⁺) et Y ³⁺	< 20°C	stabilisation totale

On peut donc conclure que si le stabilisant habituel, la chaux, assure une stabilisation acceptable pour les applications courantes, les oxydes des lanthanides constituent les stabilisants les plus efficaces. » [Collongues, 1979, p. 43-44].



Le « patron » et ses six « maîtresses » de recherche (novembre 1959). De gauche à droite : Anne-Marie Lejus, Francine Queyroux, Robert Collongues, Hélène Mondange, Jeanine Théry, Monique Perez y Jorba, Colette Frois (aimable concours d'Hélène Mondange).

Peut-on d'ors et déjà assimiler le « service des hautes températures » à une école de recherche ? Les doctorants sont suivis au jour le jour par Collongues, qui, comme l'a fait son maître, sait se montrer directif, voire même autoritaire dans ses mauvais jours. Si l'on cumule les six à sept ans du doctorat d'État (dirigé par Collongues) et les trois ans de licence universitaire (pour certains cours de Chaudron), le temps de formation des étudiants atteint une dizaine d'années sous la férule d'un maître – Chaudron – et de son ancien élève – Collongues –, tous deux directifs et exigeants en matière de rigueur expérimentale. La transmission des connaissances emprunte la voie directe d'une éducation stricte entre amphithéâtres et laboratoires. Elle concerne des méthodes bien précises, une pratique mixte couplant les manipulations à la paillasse de type chimie minérale à une transposition des concepts, des instruments de mesure et des fours utilisés en métallurgie. Jusqu'en 1962, l'équipe (Collongues et la première génération de thésards) est extrêmement homogène dans ses savoir-faire expérimentaux (tacites et explicites) et ses connaissances théoriques. Elle se distingue par une maîtrise de la synthèse à haute température d'oxydes métalliques solides, polycristallins, et par une caractérisation de leurs propriétés, essentiellement thermiques, en vue de les utiliser comme réfractaires. Les résultats de recherche sont publiés, en français, aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, grâce à l'entregent de Chaudron, académicien depuis 1954. Dans ce petit groupe remarquablement homogène, façonné sur un « moule intérieur »⁷⁵ prégnant, débarque un thésard exogène : Hans Jochen Stöcker. Cet ingénieur allemand jovial contribue « à l'étude des propriétés des solutions solides réfractaires à base de zircone et de la stabilisation de la zircone cubique » (1955-1960). Formé à la *Technische Hochschule* de Karlsruhe, il métisse la petite équipe d'idées venues d'Allemagne, par

⁷⁵ Terme popularisé par le biologiste matérialiste Buffon au cours d'un débat sur « le développement embryonnaire » qui l'opposa au leibnizien Maupertuis au milieu du XVIII^e siècle. Mentionné par Stéphane Tirard dans l'un de ses cours d'histoire de la biologie du DEA Paris VII (Épistémologie et histoire des sciences et des techniques).

exemple, l'importance des savoir-faire techniques pour un chercheur universitaire, mais il marque aussi le groupe par son originalité créatrice. La présence d'un étudiant allemand au CECM travaillant sur des matériaux pour pile atomique, si elle dépend d'un effort international de Chaudron (II.2.2.2), préfigure aussi la mise en place d'une « Communauté européenne de l'énergie atomique » (Euratom) réunissant en 1957 les six pays qui devaient constituer la Communauté économique européenne l'année suivante.

En 1957, Collongues est promu maître de recherche au CNRS. L'équipe qu'il anime forme un « groupe de recherche » dans un sens quelque peu différent du sens que lui a donné Geison [1981]. Les points communs sont l'unité de taille (petite : 5 à 6 individus identifiés), l'unité de lieu (un laboratoire institutionnel, le CECM), et l'unité d'action, ici l'orientation commune, raisonnablement cohérente, du programme de recherche (oxydes métalliques réfractaires). Alors que le groupe au sens de Geison fonctionne selon un système d'échanges réciproques avec un nombre de doctorants et de chercheurs confirmés à peu près équivalent, le Service des hautes températures reste très hiérarchisé (un baron, un chef de service et quelques valeureux étudiants) avec des orientations et des pratiques qui se transmettent à sens unique, du haut vers le bas (Chaudron vers Collongues, Collongues vers la 1^e génération). Peu d'initiatives sont laissées aux thésards puisqu'ils ne choisissent ni les sujets, ni les méthodes et rares sont les remontées de la base vers le sommet. En revanche leur revient la tâche d'un travail de paillasse, exigeant et passionnant. L'équipe pratique une science héritée du maître (favorisée même par lui) et tournée vers des objectifs que le maître a choisis. De plus, alors que la définition de Geison mentionne plusieurs « groupes », l'équipe Collongues consiste en un seul groupe qui interagit peu avec les autres services du CECM ou même avec l'extérieur. Les seuls rapports signalés sont ceux que les chercheurs entretiennent quotidiennement avec les membres de l'atelier du CECM, qui assurent les réalisations plus techniques. Le groupe Collongues ressemble davantage à la superposition de trois générations, chacune adoubant la suivante, qui finit par former un réseau dont les « nœuds » Collongues, Chaudron, le CECM, le CNRS, le CEA façonnent la matière. Le groupe Collongues sur la période (1954-1962) apparaît comme une école de recherche peu nombreuse, locale, extrêmement hiérarchisée où la part de savoir transmis (par les maîtres) est extrêmement lourde et homogène, doublement basée sur la synthèse à haute température (qui apparaît comme un savoir-faire tacite non explicitable) et les caractérisations physico-chimiques empruntées à la métallurgie.

IV.3.1.2. Deuxième cycle des réfractaires (1962-1973)

1961 constitue un tournant dans la carrière de Collongues, alors âgé de trente-sept ans : il quitte le CNRS pour la plus prestigieuse des universités françaises : la Sorbonne, où il est nommé « maître de conférences » (équivalent à professeur aujourd'hui). L'année suivante, 1962, constitue une révolution en *Chaudronnerie* quand le maître, âgé de soixante et onze printemps, passe la main à deux de ses plus fidèles lieutenants. Michel prend la direction du CECM tandis que Bénard est nommé directeur de l'ENSCP. La charnière 1961-1962 conditionne l'évolution ultérieure du « service des hautes températures ». Collongues dispose désormais d'un moyen direct pour recruter lui-même des étudiants et le départ de Chaudron libère des espaces de liberté. Michel n'est qu'un héritier (dévoué) du maître qui ne dispose ni de son aura, ni de son autorité. Collongues, moins lié par la présence efficace mais pesante, accède à une relative autonomie au sein même du CECM. Il engage une réorientation « élémentaire » vers de nouveaux domaines : les oxydes de fer, chers à Chaudron, cèdent la place aux oxydes d'aluminium, de gallium, de lanthanides et des nitrures métalliques. Les oxydes de lanthanide constituent un domaine de recouvrement avec l'activité du Laboratoire des terres rares. La zircone, qui continue d'être étudiée dans le Service, perd sa position

stratégique centrale puisque le problème de stabilisation a été résolu. Le zirconium métallique continue d'être étudié quelques chimistes (au CECM par exemple) mais intéresse surtout les métallurgistes en vue d'applications mécaniques.⁷⁶ La rupture qui sépare le premier du deuxième cycle de réfractaires est sociale (indépendance accrue), épistémologique (glissement vers de nouveaux éléments) et idéologique. En effet, en 1964, l'année où Collongues devient rédacteur de la *Revue des hautes températures et des réfractaires*, le service remplace l'appellation « hautes températures » de son nom par « réfractaires », qui est clairement plus tournée vers les applications industrielles.

Cette période correspond aussi à l'arrivée d'une deuxième génération d'étudiants – celle des années soixante –. Désormais, les thésards sont directement instruits, repérés et recrutés par Collongues : maître de conférences puis professeur à la Sorbonne (1964), chargé de conférences à l'École de chimie (1964) et à l'ÉNS de Saint-Cloud (1967). La deuxième génération le rencontre d'abord comme professeur puis seulement comme chef de service. C'est un orateur talentueux, il « entre en cours » comme « on entre en scène ». Personnage charismatique, il propose un enseignement novateur mêlant intimement la recherche de pointe aux contraintes didactiques.⁷⁷ Au début des années 1960, les étudiants observent un silence respectueux dans les amphithéâtres de la « Halle aux vins », une annexe de la Sorbonne qui deviendra le campus de Jussieu.⁷⁸ Réciproquement, la recherche de Collongues, en étant directive, contient une part importante de pédagogie. Ce refus d'une coupure entre les logiques de recherche et celles de l'enseignement a, semble-t-il, séduit et attiré les étudiants de la deuxième génération tandis que Mai 68 venait un peu infléchir le dirigisme des premiers

⁷⁶ En parallèle aux études sur la zircone réfractaire – menées par le groupe Collongues –, des chercheurs du CECM travaillent sur « l'oxydation du zirconium et de ses alliages ». Ils mentionnent son rôle « capital dans le problème du gainage de l'uranium » [RA CNRS, 1966, p. 138]. D'autre part, le 9^e colloque de métallurgie qui se tient à Saclay en juin 1965 est exclusivement consacrée « à l'étude de la corrosion et de la protection du zirconium et de ses alliages » [RA CNRS, 1965, p. 77]. Plus généralement, la métallurgie s'intéresse activement aux alliages du zirconium en vue d'applications pour l'industrie nucléaire. Au début des années 1950 par exemple, un vaste programme d'étude systématique des alliages du zirconium est lancé, le choix de cet élément étant motivé par ses propriétés peu ordinaires : « faible section de capture des neutrons », tenue mécanique, résistant à la « corrosion » (en particulier à l'acide nitrique concentré lors du « retraitement des combustibles nucléaires »). Cette recherche systématique fournira la famille des « zircalloys » : « zircalloy 2 » (zirconium et acier inoxydable à 18% de chrome et 8% de nickel) remplacera l'acier inoxydable des gaines des centrales à partir des années 1970 [Béranger & al., 1992].

⁷⁷ « Pour montrer l'attraction qu'exerçait Robert Collongues, il était enseignant ici à l'ENSCP, et c'est vraiment parce que c'était un enseignant hors pair que nous fûmes *trois de ma promotion* [c'est moi qui souligne, en 1964] à rejoindre son laboratoire en même temps [...]. S'il était un très bon enseignant c'est aussi parce qu'il faisait passer très vite des choses qui étaient encore à l'état de recherche dans son enseignement. Il présentait des résultats qu'on ne trouvait pas dans les livres. Il avait même la particularité de poser des sujets d'examens qui désarçonnaient beaucoup les étudiants parce qu'ils étaient basés sur quelque chose qu'on avait observé la veille, mais qui permettait de réfléchir. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 1]

« En tant qu'enseignant, il [Collongues] était excellent, comme Bénard d'ailleurs. J'ai assisté à ses cours car j'aimais savoir ce que le professeur disait quand j'étais chargée de TD. Il parlait très facilement, avait toujours une histoire amusante à raconter. Ses élèves l'aimaient beaucoup, lui étaient très dévoués. » [I Mondange, 2004, p. 5].

« Jusqu'au bout de sa carrière, [Collongues restera] la coqueluche des étudiants. Il entrait en cours comme lorsqu'on entre scène. » [I Serreau, 2004, p. 10].

⁷⁸ « Je me souviens quand il a été nommé professeur, mon frère m'a emmené à un des cours de Collongues, à Jussieu, le bâtiment quai Saint-Bernard existait déjà et sur le côté, il y avait aussi d'autres bâtiments appartenant à l'Université. Nous sommes arrivés en milieu de cours, vous auriez entendu une mouche voler, pas un bruit, nous arrivons en faisant du bruit, en claquant des pieds en descendant les escaliers, etc. Ah ! stupéfaction des élèves en se demandant ce qui se passait. A ce moment-là, Collongues bien sûr nous voit et se met à rire en tournant la tête vers le tableau pour se cacher. Alors là explosion de joie des étudiants dans la salle (rires !), il s'était passé quelque chose d'extraordinaire pour eux. Ça devait être en 1960 ou 61. Il fallait voir la réaction des étudiants, ils se sont retournés vers nous qui arrivions en retard et faisons du bruit : une provocation avec l'acceptation du prof. Le bonheur de quelques instants pour tous ! (rires) » [I Serreau, 2004, p. 5].

temps. De 1962 à 1973, dix-neuf thèses sont défendues sous la direction de Collongues, soit presque deux par an pendant dix ans : un rythme soutenu pour un recrutement efficace. Le charisme de l'enseignant fonctionne bien mais il doit s'accompagner d'une stratégie de récupération des postes. En 1966, grâce à l'appui de Chaudron, Collongues est élu au Comité national du CNRS dans la section 14, chimie minérale, alors présidée par Bonnier. Parti de quatre membres en 1955, le service s'est étoffé au cours des années 1960 pour compter une trentaine de membres au moment du déménagement (1972-1973). Les effectifs ont donc été multipliés par sept ou huit : c'est le baby-boom dans la « famille » Collongues ! Dans le même temps, les effectifs du CNRS ne font que quadrupler [Picard, 1990, p. 242]. Ainsi, l'équipe Collongues connaît une croissance exceptionnelle à ce moment-là, double de celle du CNRS qui est pourtant dans un « âge d'or » de croissance et de puissance. Au niveau de l'organisation, Collongues délègue le travail de supervision des thésards à ses premières étudiantes : Perez y Jorba, Théry puis Anne-Marie Lejus, rapidement promues chargées de recherche.

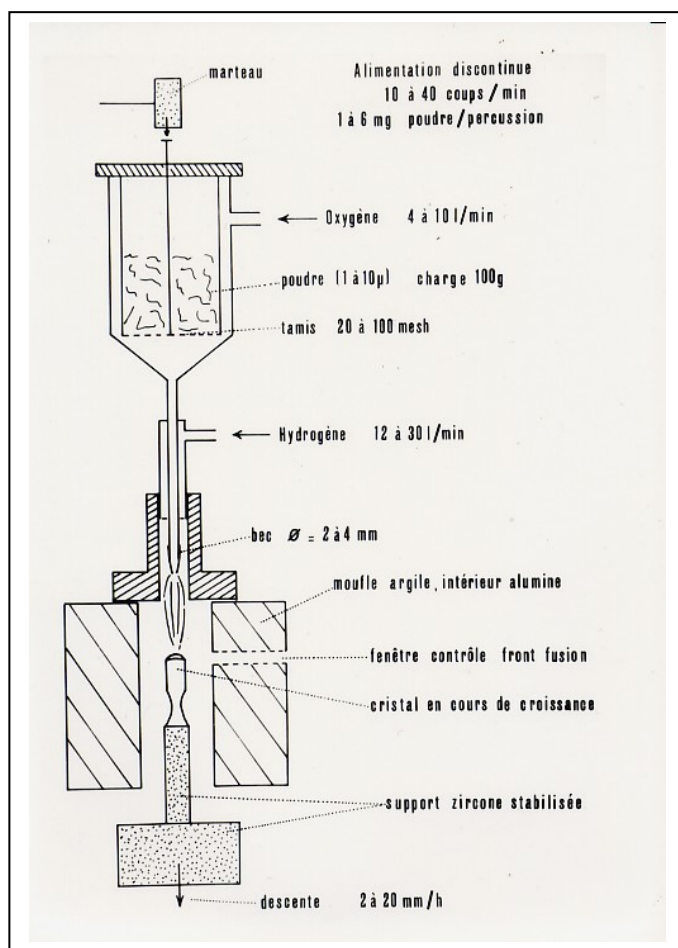
IV.3.1.3. La logique « synthèse-instrumentale », des fours à la cristallogénèse

Les deux cycles de réfractaires sont tout deux intimement liés à un développement continu des techniques de haute température au cours des années soixante : les fours d'abord, entre 1960 et 1964, puis la cristallogénèse ensuite. Même si le Service est intégré à un laboratoire de chimie métallurgique qui maîtrise les hautes températures pour les métaux, il doit très tôt développer ses propres fours avec des caractéristiques adaptées aux études qu'il mène sur les oxydes réfractaires : températures plus importantes « jusqu'à 3000°C » ; « atmosphère oxydante » (voire contrôlée dans le cas des nitrures) en non pas réductrice ; « sans pollution ni altération de composition » [Collongues, 1979, p. 12]. Tout en s'appuyant sur les savoir-faire des métallurgistes du CECM, Collongues, les étudiants et les techniciens ont adapté les fours disponibles au CECM et au niveau international à l'étude spécifique des oxydes réfractaires. Trois principales méthodes de chauffage ont été mises au point :

α) Le « four à concentration de rayonnement par système optique », couramment appelé « four à image » : « le principe de ce four consiste à former sur l'objet à chauffer, au moyen d'un système optique (lentilles ou miroirs) l'image d'une source de brillance élevée, par exemple un arc électrique. [...] Les températures atteintes sur des oxydes super-réfractaires blancs atteignent 2800°C dans un volume de l'ordre du centimètre carré. » [Collongues, 1979, p. 50]. Le four à image procède du même principe que le four solaire développé à Odeillo par Trombe et Foëx à partir de 1950 (V.2.1). Ses principaux avantages sont un contrôle de l'atmosphère, une souplesse du système optique et surtout l'absence de pollution par d'autres matériaux puisqu'il fonctionne en « auto-creuset » comme le four à rayons cathodiques du LTR (IV.1.2.1). Au début des années 1960, sous l'impulsion de Collongues, un premier four a été bricolé par les techniciens de l'atelier avec de vieux miroirs paraboliques récupérés dans des stocks militaires datant de la Seconde Guerre mondiale et une lampe de « 45kW ». Cependant ce four artisanal associe un faible rendement énergétique (une forte consommation d'énergie) à un encombrement important – 2 mètres de diamètre pour les miroirs –. Sa miniaturisation et son association à une chambre de diffraction X à haute température ont été menées par Alexandre Revcolevschi lors de sa thèse [1969] puis par « son »

étudiant Guy Dhalenne [1972].⁷⁹ La chambre de diffraction X n'a pas, semble-t-il, conduit aux résultats escomptés.

β) Le « four à plasma inductif » ou « à plasma haute fréquence » (voir schéma ci-dessous et photographie en annexe A.IV.1) : un fluide réactionnel canalisé dans un tube réfractaire en silice est ionisé et chauffé – il forme alors un plasma – par des courants haute fréquence d'origine inductive, produits par des bobines reliées à un générateur haute fréquence (GHF) autour du tube. Les températures atteintes permettent de fondre tous les réfractaires : jusqu'à vingt mille degrés au cœur mais en pratique utilisable jusqu'à des températures de l'ordre de cinq mille degrés. Par rapport à un chalumeau à plasma classique (un arc électrique entre deux électrodes), ce système présente un double avantage pour le chimiste et le métallurgiste : la vitesse d'éjection du gaz est moins élevée et il n'y a pas de pollution par les électrodes.



C'est en 1961 que François Leprince-Ringuet – fils du physicien Louis – et Collongues fabriquent le premier four à plasma du laboratoire, ce qui correspond à une première en France. Leprince-Ringuet [1968] commence alors une thèse sur la « Contribution à l'étude de l'action du carbone à haute température sur les oxydes réfractaires : zircone pure et stabilisée et oxydes des lanthanides ». En fait, c'est un

⁷⁹ Collongues « avait monté un four à image à Vitry. C'était une grande histoire, avec des miroirs datant de la guerre qu'on avait récupérés, qui n'étaient pas très gros mais qui faisait bien deux mètres de diamètre quand même ! C'était Alexandre Revcolevschi qui s'occupait d'une partie de ce projet. Le four à image avait été monté à l'extérieur du laboratoire, sous un abri. » [I Serreau, 2004, p. 1].

besoin pratique : la nécessité d'atteindre des températures au-delà de 2500°C sous atmosphère contrôlée, sans pollution afin de préparer le carbure de zirconium fondu ($T_f=3420^\circ\text{C}$), qui pousse Collongues et son élève à développer un nouveau type de four à plasma haute fréquence au laboratoire. Or les fours à plasma ont été les vedettes du premier symposium d'Asilomar en 1959 auquel Collongues a assisté comme rapporteur pour la Commission de chimie des hautes températures (V.1.1). Le travail des deux Français s'appuie sur les travaux de T.B. Reed [1961] qui a lui-même réalisé le premier four à plasma haute fréquence en 1960 aux États-Unis. Très vite, Collongues et Leprince-Ringuet [1962] publient au *Bulletin de la société chimique de France* un premier article « Sur un nouveau modèle de chalumeau à plasma » dans lequel ils exposent les principes de construction de leur four. Les perfectionnements ultérieurs de ce four prototype : par exemple, la superposition d'un champ électromagnétique continu ou alternatif, sont dus à la thèse plus technique de François Galtier [1968] : « Sur la mise au point d'un four à plasma et son adaptation à l'élaboration de monocristaux de matériaux ultra-réfractaires. Etude de quelques propriétés des monocristaux de chaux. » Une telle thèse offre un visage nouveau. Elle est financée par une société privée : la Société de Traitements Electrolytiques et Electrothermiques (STEL) et la partie synthèse/structure n'occupe que la deuxième moitié de la thèse : la première moitié est consacrée à la mise au point du four et nécessite un recours important aux théories physiques sur les plasmas et à un savoir-faire en électronique. La mise au point du four plasma haute fréquence a nécessité les travaux simultanés de deux thésards et une veille des travaux internationaux mais a rapidement – deux ans seulement par rapport aux six ans que durait la thèse – conduit à un appareil utilisable au laboratoire.

γ) La fusion des oxydes par « induction directe de la haute fréquence » et « le four à induction haute fréquence à suscepteur d'oxyde » : le principe du four est un chauffage par induction interne (effets joules des courants électriques internes) d'un matériau conducteur possédant une résistivité électrique suffisamment faible. Dans le cas des oxydes, la résistivité trop forte à température ambiante doit être abaissée en préchauffant le matériau. Ce préchauffage est effectué grâce à l'emploi du métal correspondant à l'oxyde à chauffer. Cette méthode a permis d'obtenir des oxydes de haute pureté : zircone, oxynitride d'aluminium, alumine [Collongues, 1979, p. 52-53]. Son développement et sa mise au point au laboratoire sont principalement dus à Perez y Jorba entre 1962 et 1964.

Au sein de l'équipe, le développement des fours appropriés aux oxydes métalliques constitue un sujet important entre 1960 et 1964. Il s'inscrit dans un mouvement plus large, au niveau occidental, du domaine des hautes températures (V.1.1.2). En France, autour de la Commission CNRS, la communauté s'est investie à la suite des travaux états-uniens sur les nouveaux fours : four à plasma et four à image. Ces recherches sont menées dans les laboratoires universitaires et industriels (Saint-Gobain, CEA). Pour la mise au point des fours, Collongues collabore énormément avec Anne-Marie Anthony, d'abord à Bellevue puis à Orléans.⁸⁰ Le service des réfractaires développe un effort technique : entre 1960 et 1974, cinq des dix-sept thèses soutenues sous la direction de Collongues ont pour principal but le développement ou le perfectionnement d'une technique de haute température. L'atelier et le

⁸⁰ « Mme Anthony a beaucoup travaillé avec Collongues quand elle était directrice de recherche au laboratoire des hautes températures à Orléans. Il l'avait rencontrée à l'occasion des recherches sur les fours. » [I Serreau, 2004, p. 1]

personnel technique contribuent énormément aux questions technologiques.⁸¹ Alors que le tour de main technique est masqué par le système des publications scientifiques (conférences, publications et thèses), il transparaît au niveau des remerciements des thèses. Ainsi Guy Perreau, factotum du Service, est souvent remercié par les étudiants pour ses compétences extrêmement diverses et utiles. Au delà de ce constat, il reste difficile d'évaluer les aspects qualitatifs et quantitatifs des techniciens, travailleurs de l'ombre.

Entre 1960 et 1964, les efforts du Service portent sur trois types de fours. La principale finalité n'est pas technologique mais pratique : améliorer et diversifier les synthèses de solides. La synthèse et l'étude des oxydes réfractaires restent l'enjeu majeur du groupe Collongues. Grâce aux améliorations techniques, les températures accessibles dans de bonnes conditions dépassent les 2500°C. Les chimistes peuvent ainsi travailler sur des changements de phase à très haute température. Le contrôle de l'atmosphère et l'absence de pollution constituent deux autres questions brûlantes. Selon Collongues [1979], l'année 1963-1964 constitue une date charnière, une « étape essentielle » pour le « développement scientifique » du Service par la réussite des premières synthèses de monocristaux d'oxydes.

Jusqu'en 1964, les oxydes métalliques sur lesquels travaille le CECM polycristallins. Un solide polycristallin est un cristal formé par l'agrégation de domaines monocristallins de taille micrométrique. À l'état de poudre, les micro-domaines ne sont pas liés les uns aux autres. Lorsqu'ils ont été compactés et cuits, le composé polycristallin se présente sous la forme d'un solide macroscopique. Mais celui-ci reste composé d'une multitude de micro-domaines liés les uns aux autres et orientés aléatoirement. Il contient alors des joints de grains et des pores. Un monocristal au contraire constitue un solide continu, illimité (de l'ordre du centimètre). Au début des années soixante, les chimistes du Service cherchent à obtenir des cristaux de taille supérieure au millimètre, puis ils essaient de les faire grossir de plus en plus. La taille est justement le paramètre crucial qui distingue une poudre d'un monocristal. Si l'analyse de la structure par diffraction des rayons X (méthode du cristal tournant) ne nécessite qu'un monocristal de taille faible (millimétrique), l'étude des différentes propriétés physiques (mécanique, optique) et chimiques implique l'utilisation de monocristaux de taille macroscopique, de l'ordre du centimètre. Les composés polycristallins ont deux désavantages : présenter des défauts étendus (joints de grain, porosité) et ne pas rendre explicite l'anisotropie des propriétés lorsqu'elle a lieu. À chaque type de four (α , β , γ), Collongues cherche à associer un type de synthèse (α' , β' , γ') en recourant uniquement à des synthèses sans creuset pour éviter les pollutions.⁸²

α') La méthode de la « zone flottante » associée au four à concentration de rayonnement (α) : « L'oxyde de départ est fritté sous forme de barreau cylindrique et placé au foyer chaud d'un four à image [...] Une petite zone du barreau est fondue par concentration de rayonnement. Par déplacement vertical du barreau, la source chaude restant fixe, cette zone fondue est amenée au contact d'un germe monocristallin placé à la partie inférieure du barreau. La cristallisation commence à partir de ce germe et se développe le long du barreau par déplacement de celui-ci en sens opposé. » Cette

⁸¹ « dans chaque laboratoire, il y avait souvent une personne qui s'occupait des photos car c'était un gros travail. Mais cette personne faisait aussi autre chose, en l'occurrence le responsable des photos chez nous s'occupait aussi du bricolage. Il savait tout faire. Il aidait énormément les thésards ou les ingénieurs à fabriquer des pièces, c'était vraiment un homme précieux qui avait un savoir faire manuel étonnamment étendu, une extrême gentillesse, et beaucoup d'astuces. – PT : Comment s'appelait-il ? – DS : Guy Perreau. – PT : Il était vraiment affecté au groupe Collongues alors ? – DS : Oui, il lui est arrivé de travailler pour d'autres laboratoires mais c'était exceptionnel. En général, le laboratoire Collongues était prioritaire. » [I Serreau, 2004, p. 2].

⁸² « Le choix de la méthode de cristallogenèse sans creuset était évidemment dicté par les méthodes de haute température qui nous était familières. » [Collongues, 1979, p. 55].

méthode est décrite comme très générale qui peut être utilisée pour tout oxyde dont la température de fusion est « inférieure à 2500°C », quelle que soit l'atmosphère, sur de petites quantités de matériaux, sans qualité intrinsèque particulière. De nombreux oxydes sont ainsi synthétisés avec des tailles comprises entre « 20x10x10mm » pour le protoxyde de fer à « 200x6x6mm » pour de l'alumine corindon Al_2O_3 [Collongues, 1979, p. 56-57].

β') La « méthode de Verneuil » associée au four à plasma (β) : La méthode de Verneuil – ensemencement régulier d'un germe monocristallin dont la partie supérieure est maintenue en fusion par la flamme d'un chalumeau – est utilisée depuis près de cinquante ans dans l'industrie pour fabriquer rubis et corindons. Galtier transpose la méthode industrielle en remplaçant le chalumeau par le four à plasma. Ainsi, « l'oxyde est injecté sous forme de poudre dans le plasma. Il fond au cours de la traversée du plasma et se solidifie sur un support refroidi animé d'un mouvement de translation destiné à maintenir fixe le front de cristallisation. » En 1964, il obtient les premiers monocristaux synthétisés dans le Service. Pour fêter dignement ce minuscule monocristal de chaux (millimétrique), tout le Service sable le champagne !⁸³ Dans les années qui suivent, Galtier élabore des « monocristaux de matériaux ultra-réfractaires » de plus en plus gros (1964-1968). La méthode fournit des cristaux très purs dont la structure n'est pas parfaite (à cause d'un refroidissement trop rapide) mais mêmes les solides les plus réfractaires peuvent être synthétisés ainsi grâce au four à plasma (jusqu' à des températures comprises entre 4000 et 5000°C). Des cristaux de chaux, oxyde de calcium qui fond à 2900°C, peuvent être ainsi atteindre plusieurs centimètres de hauteur. Plus tard (1972-1976), c'est encore par cette méthode que « l'élaboration de monocristaux de tous les oxydes de lanthanide fut réussie pour la première fois par A.M. Lejus » et deux de ses étudiants, R. Tueta [1972] et J.P. Connan [1973].

γ') Le « tirage Czochralski » associé au four à induction de haute fréquence (γ) : un germe monocristallin est mis au contact d'un bain fondu qui a la même composition que le germe solide et une température légèrement supérieure à la température de fusion. Quand un ménisque se forme, le germe est tiré très lentement vers le haut, le mélange fondu suit le germe en se refroidissant lentement, il cristallise alors dans les mêmes orientations que le germe auquel il est lié. La régulation des paramètres (température, vitesse, diamètre...) permet de contrôler la taille et la qualité du cristal obtenu. La méthode Czochralski, mise au point dès les années 1920 par son auteur éponyme, pour les métaux est utilisée par les industriels pour le tirage des monocristaux (à Saint-Gobain notamment). La méthode a été transposée dans le service par un couplage avec un four à induction pour chauffer le bain fondu. Elle a nécessité de multiples mises au point extrêmement délicates afin de fabriquer des monocristaux sans (trop de) défauts de structure.⁸⁴

⁸³ « Au début, l'obtention de monocristaux – en particulier, de rubis par tirage Verneuil – excitait tout le laboratoire. » puis « Oui, avec Galtier et Revco . Les monocristaux, quand ils parvenaient à fabriquer un cristal de 1 millimètre au début, ils étaient tous joyeux. » [I Serreau, 2004, p. 1, 18].

« Quand je suis arrivée au laboratoire, François Galtier, un ancien de cette école, faisait des cristaux avec un chalumeau à plasma. C'était difficile ; il dormait au laboratoire parce que les bouteilles de gaz s'épuisaient tellement vite pour faire son plasma qu'il ne pouvait le laisser la nuit sans surveillance, il fallait changer la bouteille tout le temps. Chaque fois qu'il obtenait un beau cristal, on buvait le champagne. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 7].

⁸⁴ « On met [un] composé dans un creuset, ensuite on amène un germe monocristallin au contact du liquide, on forme un ménisque et on s'arrange pour que le liquide ait juste une température très proche de celle de la

Outre ces trois méthodes, chacune adaptée à un type de four que maîtrisent les chercheurs du Service, une quatrième méthode de cristallogenèse est utilisée : la méthode des flux. À nouveau importée des États-Unis, la synthèse opère, non pas à partir de l'oxyde fondu, mais d'une « solution » dans un creuset. L'oxyde est dissous à l'état liquide dans un autre composé à température de fusion relativement basse, qui joue le rôle de « fondant », c'est-à-dire qui abaisse la température de fusion du mélange (principe du chlorure de sodium dans l'eau qui abaisse la température de fusion du mélange). Au cours du refroidissement lent de ce liquide, l'oxyde voulu précipite d'un côté, le fondant de l'autre, et peut ainsi être récupéré. Cette méthode, qui se fait à petite échelle par rapport aux trois précédentes, permet la synthèse de monocristaux de structure parfaite (sans contrainte mécanique, ni dislocation, ni gradient de température) pour des super-réfractaires dont la température de fusion est trop haute pour les fondre par les autres techniques de haute température. Cependant, elle présente des pollutions par les éléments du fondant. C'est Andrée Kahn-Harari qui la première au Service l'utilise pendant sa thèse (1964-1970) pour fabriquer de l'oxyde de thorium qui fond à 3500°C.⁸⁵

Comment résumer cet ensemble d'innovations techniques et d'évolutions sociales ? Que se passe-t-il au Service des hautes températures entre 1954, lorsque le jeune docteur, encouragé par son maître, en prend la direction, et 1973, quand le professeur et son équipe quittent le CECM ? Une première lecture, « élémentaire », montre une diversification des thèmes de recherche. Initialement, Collongues oriente la moitié de ses étudiants et étudiantes vers les oxydes de fer et l'autre moitié vers les composés à base de zircone. L'empreinte du maître est forte dans ces choix : les oxydes de fer demeurent le domaine réservé de la *Chaudronnerie* tandis que la zircone répond à des applications réfractaires, nécessaires au CEA, que Chaudron encourage, voire permet. Le service des hautes températures s'engage donc simultanément sur une première voie, plus traditionnelle, déjà empruntée en *Chaudronnerie* et une seconde, plus actuelle, des matériaux pour l'industrie nucléaire. Les recherches menées pour stabiliser la zircone diversifient l'activité du Service vers de nouveaux métaux (cations) : alcalino-terreux, métaux de transition et les terres rares. La charnière 1961-1962, qui rend le service plus autonome après le départ de Chaudron et le professorat de Collongues, permet de diversifier encore plus les éléments étudiés. Cette lecture chimique est d'ailleurs suggérée par Collongues lui-même, qui, dans sa *Notice des titres et travaux* [1979], classe les résultats des travaux du laboratoire suivant une logique « élémentaire ».

Pourtant, ce n'est pas la logique « élémentaire » qui offre la lecture la plus pertinente de la période 1954-1973. Durant les années soixante, l'objectif principal du groupe est de développer les techniques de haute température en vue de la synthèse. Son implication à la Commission de chimie des hautes températures du CNRS puis dans la *Revue des hautes températures et des réfractaires* en témoigne largement. L'évolution se fait en deux temps. La

solidification. Ensuite on tire très lentement le germe vers le haut et ce germe sert de point de départ à la cristallisation d'un cristal. En contrôlant la masse de cristal tirée par unité de temps, on forme une tête et puis ensuite on fait une régulation de diamètre, c'est-à-dire qu'on s'arrange pour avoir un accroissement de masse constant par unité de temps pour une vitesse de tirage constante. [...] on a mis très longtemps à perfectionner [cette méthode] parce qu'elle est délicate » [I Vivien, 2004, p. 8-9].

⁸⁵ « la méthode des flux [...] est une méthode très connue, ce n'est pas moi qui l'ai inventée. [Elle] avait commencé aux États-Unis et [...] ne demandait pas du tout la même quantité de matière, ni les mêmes infrastructures, le même chauffage. C'est une méthode de laboratoire qui permet de fabriquer des produits qu'on ne pouvait pas porter à la fusion parce qu'ils fondaient vraiment trop haut. C'est le cas d'un produit que j'ai fait, qui fond à 3500°C, [...] l'oxyde de thorium » [I Kahn-Harari, 2004, p. 7].

première étape consiste à adapter les fours utilisés en métallurgie à l'étude des oxydes métalliques : contrôler l'atmosphère d'abord (1954-1960) puis mettre au point pour les oxydes de nouveaux fours déjà utilisés aux États-Unis (1960-1964). Ce premier mouvement s'inscrit dans la logique de la communauté des hautes températures (V.1). En développant les techniques de production de haute température, Collongues pense à la cristallogenèse. La première synthèse monocristalline est réalisée sur de la chaux en 1964 grâce au chalumeau à plasma. Par la suite (1964-1973), la méthode Czochralski et la fusion par induction directe haute fréquence permettent aussi de fabriquer de nouveaux monocristaux de taille centimétrique. Le groupe Collongues s'impose ainsi au cours des années soixante comme l'un des spécialistes mondiaux de la cristallogenèse. Au delà des performances technologiques et chimiques, c'est la connaissance du cristal qui motive Collongues. En effet, travailler sur des monocristaux permet de s'affranchir des inconvénients des polycristaux : inhomogénéités entre les grains et effet de moyenne sur les propriétés anisotropes. La cristallogenèse, que maîtrisent les chimistes, permet ensuite de se tourner vers les propriétés physiques. Sur ce point, il est vrai que les propriétés thermiques – réfractaires – et l'approche thermodynamiques sont les plus prisées au Service. En cela aussi, il est très proche de la communauté française des hautes températures. Cependant, isotropie de structure et joints de grain ne sont pas déterminantes pour les propriétés réfractaires. Si Collongues cherche à mettre au point avec tant de volonté la cristallogenèse, c'est bien parce qu'il est intéressé par d'autres propriétés physiques. Des mesures de conductibilité électrique en particulier sont réalisées. La relation structure-propriétés constitue désormais un lieu de passage obligé pour la compréhension du solide. Les années soixante mettent donc en évidence au Service des réfractaires la manière dont la cristallogenèse, en étant au cœur des préoccupations des chimistes, loin de les éloigner des propriétés physiques en rend l'étude possible. C'est un moment où l'originalité chimique s'exprime non par l'invention de solides inédits mais par la synthèse de nouveaux monocristaux d'oxydes métalliques.⁸⁶

IV.3.2. De l'idée à la matière : incarnation de la chimie appliquée de l'état solide (1965-1974).

IV.3.2.1. Chimie de l'état solide au milieu des années soixante : modernité ou propagande ?

Avant de poursuivre sur les évolutions thématiques des années soixante-dix au laboratoire, il convient de revenir quelques instants sur la chimie dont se réclame Collongues. Un texte programmatique, intitulé « La chimie de l'état solide » [1966] et issu d'une conférence prononcée à l'université de Reims en novembre 1965, permet de situer la vision qu'un professeur de quarante et un ans développe sur son travail. La conférence, découpée en deux parties, cherche d'abord à définir les « caractéristiques de la chimie de l'état solide ». Pour Collongues, la chimie est définie – de manière non problématique – comme « l'histoire des électrons externes de l'atome ». S'appuyant sur les diagrammes de bande typiques des solides, il poursuit en ces termes : « il n'existe aucune discontinuité entre les différents types de solides [...]. Ainsi apparaît totalement injustifiée la vieille définition descriptive du métal qui consistait à dire : un métal est un corps présentant un ensemble de propriétés

⁸⁶ Collongues « ne créait pas d'espèces nouvelles mais tentait d'améliorer ce qui se faisait dans la nature. Pendant cinq ans, j'ai travaillé avec lui et Mme Perez sur des pyrochlores. » [I Lucas, 2006, p. 1].

caractéristiques dont les principales étaient les conductibilités électrique et thermique élevées résultant de la présence d'électrons libres. En fait, il existe des électrons libres dans tous les solides. Les différences entre métaux, isolants et semi-conducteurs résultent uniquement de la disposition relative des zones de Brillouin. » Collongues milite ici explicitement pour une continuité épistémologique de l'état solide, qu'il justifie par une continuité des niveaux électroniques lorsque l'on passe d'un métal à un isolant. Cette continuité s'incarne en une chimie de l'état solide qu'il redore avec l'emploi de la théorie des bandes. Après avoir écarté la primauté des phénomènes électriques, il pose le postulat de base de la conférence : « les propriétés du solide [...] résulteront de l'arrangement compact et régulier des atomes », ce qui peut aussi s'écrire : structure→propriétés. À ce postulat de base correspond trois conséquences pratiques : 1°) « les propriétés essentielles du solide doivent pouvoir être déduites du simple examen de sa structure » ; 2°) « la construction d'une structure fera nécessairement intervenir des facteurs autres que les facteurs chimiques : des facteurs géométriques par exemple » ; 3°) dans de nombreux cas, les « propriétés du solide sont entièrement et exclusivement déterminées par les défauts ». Ces trois points étaient déjà exprimés par Bénard [1951] quinze ans plus tôt à la Société chimique de France (III.4.1.). Ici, Collongues les exprime d'autant plus clairement qu'il les a reliés aux diagrammes de bande et à l'idée d'électrons externes. Il conclue la première partie par une formule choc : « Le cristal n'est [...] qu'un simple support d'imperfections. »

La deuxième partie glisse de la chimie de l'état solide aux « progrès récents en chimie appliquée de l'état solide ». La chimie appliquée de l'état solide constituerait « l'étude des applications [mécaniques, physiques ou chimiques] des composés solides. » Vaste domaine ainsi défini qui recouvre les travaux récents sur : les « ferrites » (MFe_2O_4) utilisées dans les « radars » et les « aimants permanents » ; les « semi-conducteurs » des transistors (Si, Ge, alliages Ge-As, Ge-Al) ; les « masers, lasers » (rubis : $Cr_2O_3-Al_2O_3$) ; les réfractaires (silice, alumine, graphite, BN). Collongues associe donc aux propriétés magnétiques, électriques, optiques, thermiques et chimiques non seulement des composés minéraux mais encore des alliages et le graphite. Pour lui, la chimie de l'état solide « se situe au carrefour de disciplines très diverses : chimie, métallurgie, cristallographie, physique. » Il ne renie pas pour autant la « chimie minérale moderne » à l'intérieur de laquelle se situe la « chimie structurale ». Ici encore, le rapport, que Collongues juge essentiel, entre la chimie de l'état solide et l'industrie peut s'exprimer ainsi : propriétés→applications. Il ne cesse d'ailleurs d'utiliser le mot « matériaux » avant de conclure sur le rôle primordial du chimiste pour préparer ces « matériaux de haute qualité ».

Que conclure d'après ce texte sur la chimie revendiquée par Collongues ? La chimie qu'il assume ici se place dans la droite ligne de la *Chaudronnerie* même si elle s'est enrichie des représentations théoriques du type théorie des bandes. Ainsi Collongues définit une chimie à l'interface avec la cristallographie, la métallurgie, la physique et l'industrie, qui, dans son élan de continuité épistémologique, va jusqu'à couvrir l'ensemble des solides ioniques, métalliques et métalloïdes suivant selon la double relation : **structure→propriétés→applications**. Les solides organiques en revanche sont soigneusement distingués de cette chimie, avant tout « minérale », même si la relation structure-propriétés lui est empruntée : « de la même manière que les propriétés des composés moléculaires sont déterminées par la structure de la molécule. » En décrivant ce qu'il appelle en 1965 « chimie de l'état solide », Collongues énonce la matrice disciplinaire qu'en 1979, il fait correspondre à « chimie des matériaux » (III.2.2). Seul le nom change, les idées forces restent. Signe d'un monde en évolution, qui fait se succéder les modes : la chimie de l'état solide renvoie à la *Chaudronnerie* (II.2) au moment de son apogée tandis que la chimie des matériaux s'inscrit dans la rhétorique anglo-saxonne des « matériaux » des années soixante

(III.4.3). Signe aussi d'un homme qui a mûri délaissant les références de sa jeunesse pour celle de son époque. Il semble que le « moderne » (plusieurs fois dans le texte) hante l'esprit de Collongues. Il se réclame de la modernité pour la chimie minérale et pour l'industrie. Même si la mission première du chimiste reste la synthèse chimique, il doit surtout être moderne. En 1965, lorsqu'il tente de concilier la tradition familiale à la modernité, il forge une nouvelle expression : « chimie appliquée de l'état solide » par laquelle il désigne son travail.

IV.3.2.2. Création du Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide (1971-1974).

Au cours des années soixante, le Service des réfractaires montre de plus en plus d'indépendance vis-à-vis du CECM. En 1964, le CNRS précise l'orientation du service vers « les hautes températures et la chimie de l'état solide » à Vitry-sur-Seine [RC CNRS, 1964, p. 77]. Collongues voudrait atteindre une pleine autonomie. Ses liens avec l'École de chimie de Paris se resserrent. Non seulement il y est professeur mais encore il y recrute de nombreux ingénieurs chimistes. Parmi les trente et un étudiants et étudiantes recrutés dans le Service en vingt ans (1954-1973), treize sont diplômés de l'École, soit plus de 40% des thésards. En 1971, Collongues dispose d'un bureau puis l'année suivante de quelques salles où certains de ses collaborateurs travaillent. En accord avec Chaudron et Bénard, il désire fonder un laboratoire à l'École. En mars 1972, le premier numéro des *Annales des laboratoires de l'ENSCP* mentionne le Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide (LCAES). Le déménagement de Vitry-sur-Seine à Paris n'aura finalement lieu qu'en 1973. Il n'est pas total car un groupe, dirigé par Perez y Jorba, demeure à Vitry tout en appartenant au LCAES. Jean-Claude Gilles profite aussi de l'occasion pour partir fonder un laboratoire à l'ESPCI (1972) avec quelques-autres. Pour atteindre une taille suffisante, le groupe Collongues s'est associé à un petit laboratoire de cristallographie déjà installé à l'École et dirigé par Michel Huber, un ancien élève de Bénard [Teissier, 2007]. Collongues dispose enfin des coudées franches dont il rêvait. Le laboratoire est associé au CNRS dès sa création et à l'université parisienne via l'École. La présence de trois institutions de tutelle – CNRS, Paris 6, ENSCP – permet de recruter enseignants chercheurs et chercheurs, de profiter du prestige de l'École au cœur de la Montagne Sainte Geneviève. L'École paye aussi les frais de base du laboratoire (eau, électricité). La création s'accompagne d'un inédit : entre 1972 et 1975, Collongues recrute quatre enseignants chercheurs (Noël Baffier, Jacques Livage, M. Michaud, Daniel Vivien) et une chargée de recherche (Dominique Ballutaud) qui n'ont pas fait leur thèse au laboratoire. Trois des cinq entrants sont diplômés de l'École : Livage (1960), Vivien (1964), Ballutaud (1967). Ce sera la seule entorse à la règle de l'endo-recrutement pratiquée sous l'ère Collongues (1954-1988) ! Le choix des thésards quant à lui va s'élargir vers d'autres écoles pour la troisième génération d'étudiants – celle des années 1970 – : ENS, École de céramique de Limoges (ENSCIL)...

En interne, le LCAES se structure suivant quatre équipes formées autour d'individus promus chefs de file : les équipes Huber-Baffier, Théry-Vivien et Livage à l'École de chimie et l'équipe Perez y Jorba demeurée à Vitry-sur-Seine. Il est marquant que trois des nouveaux arrivants prennent rapidement des responsabilités hiérarchiques (plus ou moins formelles). Chacune des équipes suit un programme de recherche qui lui est propre : 1° « cristallographie » pour Huber-Baffier (diffraction X, écart à la perfection) ; 2° « superconducteur ionique »* pour Théry-Vivien ; 3° « spectroscopie » pour Livage ; 4° « méthode et matériaux de hautes températures » pour Perez y Jorba (associée à Revcolevschi). Le groupe (4) en restant à Vitry a hérité des équipements de haute température

les plus encombrants, qui n'ont pu être déménagés à Paris dans des locaux plus exigus. Les thèmes (2) et (3) sont les seuls à être explicitement reliés à la « chimie du solide » [ENSCP, 1974].

Suivant son appréciation exposée à Reims en 1965 (IV.3.2.1), Collongues fait donc le pari de la « chimie appliquée de l'état solide » plutôt que de la « chimie du solide ». ⁸⁷ Ce choix personnel est idéologique. Sa formulation serait plus conforme à la réalité disciplinaire parce qu'elle rend compte d'aspects cognitifs (état solide) et industriels (appliqué). Elle poursuit aussi l'œuvre de la *Chaudronnerie* à laquelle Collongues reste attaché. Il pense que la chimie appliquée de l'état solide inclut la chimie du solide, plus restreinte (dans ses limites) et trop universitaire (dans sa formulation). Les « matériaux de hautes températures » par exemple ne sont pas vraiment étudiés en chimie du solide alors qu'ils font partie intégrante de la chimie appliquée de l'état solide. Après une phase de militantisme rhétorique – lors de conférences comme à Reims (1965) –, la fondation du LCAES permet donc un ancrage local et social de la chimie appliquée de l'état solide. Même si cette institutionnalisation est partielle (un seul laboratoire associé et non pas propre), elle défend une autre façon d'étudier les solides lorsque l'on est chimiste : ni chimie du solide, ni chimie des hautes températures mais une chimie appliquée de l'état solide qui les englobe toutes les deux et qui ne refuse pas une alliance avec des cristallographes (comme au LCAES même l'association avec Huber comporte des éléments tactiques).

La fondation du LCAES met en oeuvre un changement disciplinaire, préconisé dès 1965. Elle rompt le consensus thématique des années soixante autour des réfractaires et ouvre le Laboratoire vers de nouveaux thèmes (comme les pyrochlores) au cours des années 1970. Le plus important de ces thèmes concerne les « superconducteurs ioniques » qui, à la manière des deux cycles réfractaires (IV.3.1), vont se déployer durant une décennie (1970-1980).

IV.3.3. Une recherche fondamentale sur fond de crise énergétique : les « superconducteurs ioniques »

En 1967, des chercheurs de *Ford Motor Company* aux États-Unis annoncent la fabrication prochaine d'un accumulateur solide aux applications exceptionnelles. Leurs deux articles font sensation. Ils ont repris l'étude d'un aluminate de sodium déjà connu, improprement nommé « alumine bêta ». ⁸⁸ Le premier article [Yao & Kummer, 1967] présente les propriétés physico-chimiques remarquables de l'alumine bêta : conductivité ionique forte (même ordre de grandeur que celle des bons électrolytes liquides), faible transfert électronique et passivité chimique. Le deuxième [Weber & Kummer, 1967] explique comment à partir des propriétés électriques il va être possible de fabriquer un accumulateur sodium-soufre où l'alumine bêta jouera le rôle d'« électrolyte solide ». ⁸⁹ L'application sensationnelle

⁸⁷ L'année suivante, le laboratoire Hagenmuller à Bordeaux devient entité propre du CNRS sous l'appellation « Laboratoire de chimie du solide » (IV.4.2.1). La simultanéité des dates n'est pas un hasard dans la lutte institutionnelle que se livre les deux mandarins.

⁸⁸ L'alumine bêta est un oxyde ternaire ordinaire, d'abord identifié à tort en 1916, comme une forme allotropique (structure cristalline différente mais même composition chimique) de l'alumine (Al_2O_3) lors du procédé Bayer de préparation de l'alumine. L'alumine bêta, contrairement à ce que suggère son nom, n'est pas une alumine mais un aluminate de sodium. Les principales caractéristiques structurales de l'alumine bêta et sa composition furent déterminées par la diffraction des rayons X dès les années trente et une première formule fut donnée : $(11 Al_2O_3, Na_2O)$ [Bragg & al., 1931 ; Beevers & Ross, 1937]. D'après une note rédigée par Hervé Arribart (site Internet histoire des matériaux de la SFC).

⁸⁹ Étymologiquement, un électrolyte signifie « électricité soluble ». De manière générale, un électrolyte est un composé qui, dissous dans un liquide, est susceptible de conduire le courant électrique grâce au mouvement de

que Ford fait miroiter est la réalisation de batteries électriques solides, qui à terme assurerait la locomotion des automobiles.⁹⁰ Les deux articles résonnent comme un coup de tonnerre dans les milieux industriels de l'automobile et de l'énergie. Ils annoncent une transformation complète de la technologie automobile : les voitures électriques d'utopiques deviennent possibles. L'enjeu est de taille. De nombreuses recherches sont donc entreprises, surtout aux États-Unis, soit par les industriels eux-mêmes, soit par universitaires interposés pour mettre au point de meilleurs électrolytes solides. C'est l'explosion des « superconducteurs ioniques » à l'échelle internationale.⁹¹ Ford, General Electric, Bell Telephone, Xerox, IBM, Brown-Boveri, Philips, « les plus grandes sociétés industrielles du monde » se lancent dans l'aventure et financent « des recherches fondamentales de très haut niveau » [Collongues, 1979, p. 14].

Car, l'énergie est un domaine stratégique pour assurer la croissance des pays les plus industrialisés. Certes, le prix des hydrocarbures a fortement décliné depuis la fin des années cinquante mais les consommateurs du Nord n'en demeurent pas moins dépendants des producteurs du Sud. À la fin des Trente Glorieuses, en 1973, la France dépend pour les trois quarts de sa consommation énergétique d'importations étrangères, le nucléaire civil ne répondant qu'à 2% de sa consommation ! [Berstein & Milza, 1999, p. 140-141]. La possibilité de produire des accumulateurs électriques puissants couplée au développement accru du nucléaire civil assureraient une plus confortable indépendance énergétique aux pays riches. Une telle perspective rend donc les électrolytes solides cruciaux pour l'avenir, ce qui explique l'engouement qu'ils provoquent dès la fin des années 1960.

En 1970, la Compagnie Générale d'Électricité (CGE, future Alcatel) vient demander à Collongues d'étudier la famille des aluminates de sodium dont est issue l'alumine bêta. La demande industrielle de la CGE va jouer en 1970 pour les superconducteurs ioniques le même rôle de déclencheur-financeur auprès du laboratoire qu'avait eu le CEA en 1954 pour les réfractaires. Un financement industriel à vocation appliquée induit le début d'un cycle de recherche fondamentale. Cette fois-ci ce n'est pas l'entregent de Chaudron qui fait la différence mais la production scientifique du Service. La CGE vient voir Collongues parce qu'elle a repéré d'intéressantes publications sorties de son groupe en 1962.

IV.3.3.1. Approche structurale des aluminates de sodium (1961-1965)

Au cours de l'année universitaire 1961-1962, un étudiant en diplôme d'études supérieures (DES), Daniel Briançon [1962], contribue à l'« étude des aluminates de sodium » sous la direction de Théry. Celle-ci avait poursuivi l'étude des oxydes de fer en se tournant vers quelques ferrites alcalines à une époque où les ferrites sont à la mode (après les travaux de Bertaut et Néel des années cinquante). Conseillée par le patron, Théry décide ensuite de travailler sur les aluminates de sodium, guidée par leur proximité structurale avec les ferrites. À l'époque, Théry et Briançon s'intéressent à la détermination structurale de l'aluminate

ses ions en solution. L'emploi courant désigne la solution conductrice elle-même. De même, un électrolyte solide assure le passage du courant par le mouvement d'ions (et non pas d'électrons comme dans un métal) mais ces ions se déplacent au sein d'une matrice solide. Jusqu'à l'alumine bêta, la conductivité ionique des solides était jugée bien moindre que celle des électrolytes liquides.

⁹⁰ Les caractéristiques de l'accumulateur de Ford sont les suivantes : énergie massique 20 fois supérieure à celle de l'accumulateur au plomb (1000 Watt.heure⁻¹.kg⁻¹) ; forte tension en circuit ouvert (2,08V), semblable à celle de l'accumulateur au plomb ; forte densité de courant 200 mA.cm⁻² ; fonctionnement à température modérée (300°C) ; utilisant des réactifs bon marché (sodium et soufre) [Collongues, 1979, p. 67].

⁹¹ Un superconducteur ionique désigne un conducteur ionique qui possède une grande conductivité électrique : entre 10⁻⁴ et 10⁻¹ Ω⁻¹cm⁻¹ à 300 K, « grande » par rapport à celle du chlorure de sodium : 10⁻²⁰ Ω⁻¹cm⁻¹ à la même température [Collongues, 1979, p. 67].

NaAlO_2 et des composés de type alumine bêta ($\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$). Leur recherche se clôt sur une comparaison structurale entre le système alumine-aluminate de sodium ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NaAlO}_2$) et les différents systèmes sesquioxyde de fer-ferrite de métal alcalin ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-MFeO}_2$). Briançon détermine le « diagramme d'équilibre » de l'alumine bêta et prépare une nouvelle forme d'alumine bêta de formule (NaAl_5O_8), renommée a posteriori « alumine β'' ». Il conclue ainsi son travail : « du point de vue structural le système alumine-aluminate de sodium se rattache à l'ensemble des systèmes oxyde de fer-ferrites de calcium sans présenter d'analogies particulières avec l'un d'entre eux. » L'objectif principal a été atteint : déterminer la composition et la structure de composés nouveaux de type aluminate et les comparer à des structures connues, les ferrites.

Les résultats sont publiés dans les *Comptes rendus* en 1961 puis 1962. Le deuxième article porte sur l'alumine β'' : « Sur les propriétés d'un nouvel aluminate de sodium NaAl_5O_8 ». En tout, quatre articles sont publiés entre 1961 et 1965. L'outil de base est la diffraction de rayons X sur poudres qui permet la détermination structurale des échantillons d'aluminate. Le recours à l'étude structurale et aux diagrammes de phase est courant à l'époque en *Chaudronnerie* (II.4) et ailleurs (IV.1.2). L'étude structurale des aluminates s'arrête là. Au début des années 1960, les chercheurs du groupe n'ont donc pas mesuré la conductivité électrique des aluminates, ce qui avait été fait pour la zircone par exemple. Un DES ne dure qu'un an, n'a pas la profondeur d'une thèse de l'époque. Il s'est d'abord focalisé sur les déterminations structurales en laissant de côté la caractérisation des propriétés électriques. Celle n'est alors pas systématique. La conduction ionique des aluminates n'avait donc pas été détectée, ni supputée.

IV.3.3.2. Cycle des superconducteurs ioniques (1970-1980) : entre financements industriels et logiques instrumentales

Lorsque l'argent des industriels – CGE puis Électricité de France (EDF) – commence à financer les recherches du Laboratoire, Théry est toujours perçue comme la spécialiste de l'alumine bêta sur les questions de synthèse et de structure. C'est pourquoi Collongues lui confie à partir de 1970 l'encadrement du premier thésard, Yves Le Cars [1974], sur « l'étude de la structure et des propriétés des aluminates de sodium (aluminés β et β'') en vue de leur utilisation comme électrolyte solide ». L'énoncé de la thèse montre que les préoccupations ont changé depuis 1962. Il contient une référence explicite aux applications recherchées « utilisation comme électrolyte solide » et, outre la structure, mentionne les « propriétés ». La thèse de docteur ingénieur, financée par la CGE, est confiée à un jeune diplômé de l'École. Le chapitre I de la thèse retrace l'évolution technique de l'accumulateur sodium-soufre faisant ainsi écho à l'appel vers les applications, déjà présent dans le titre. La structure n'est donc plus étudiée pour elle-même – comme en 1961-1962 – mais dans sa relation aux propriétés, elles-mêmes liées aux applications. Le chapitre II met en relation une étude structurale (diffraction de RX) avec une étude de conductivité sur des échantillons polycristallins, ce qui aurait été techniquement possible en 1962. Pour la première fois au Laboratoire, un énoncé de thèse est aussi explicite sur la double relation structure→propriétés, propriétés→applications dont se réclame Collongues [1979]. En pratique, la thèse nécessite la collaboration avec un laboratoire de physique des solides et un laboratoire de métallurgie. Dans les « remerciements » en tête de thèse sont mentionnés, outre les membres du laboratoire Collongues, deux ingénieurs matériaux, P. Margotin et Y. Lazenec, deux professeurs Guinier (LPS, Orsay) et Fayard (Laboratoire de métallurgie structurale des alliages ordonnés, Orsay), un maître de recherche, R. Comès, un technicien L. Deschamps, deux attachés de recherche, D. Gratias et R. Portier [Le Cars, 1974]. Pourquoi tant de monde pour étudier un si petit solide ?

La simple diffraction des rayons sur poudre, devenue routinière chez les chimistes, ne suffit plus. En effet, les chercheurs de Ford, après avoir mesuré la superconductivité des aluminates, ont essayé de l'expliquer. L'alumine bêta présente une structure bidimensionnelle. Le cristal, anisotrope, est composé de fines couches parallèles d'alumine dense séparées par des plans « vides » où sont confinés tous les ions sodium. Comme l'alumine bêta n'est pas stœchiométrique, les ions sodium (Na^+) présentent un excès de charge par rapport à la composition idéale, qui est compensé par l'apport d'atomes d'oxygène supplémentaires. C'est l'étude de la structure et plus particulièrement de l'organisation des cations Na^+ dans les plans de conduction qui permet de donner une explication de la superconduction de l'alumine bêta. Il existe une étroite corrélation entre l'état de désordre bidimensionnel des cations Na^+ et la conductivité électrique. Or, la « diffraction de Bragg renseigne seulement sur l'ordre moyen à grande distance. La diffusion des rayons X (dite anormale ou diffuse) apporte au contraire des renseignements sur l'ordre local à l'échelle de la maille élémentaire » [Collongues, 1979, p. 70]. Comme l'organisation atomique (de 1 à 10Å) est devenue primordiale, les chimistes du groupe, qui ne maîtrisent pas suffisamment les caractérisations locales (savoir-faire) et ne disposent d'ailleurs pas de l'équipement nécessaire, se tournent vers ceux qui savent faire et possèdent : les physiciens des solides et les métallurgistes. Le rapprochement vers la physique et les collaborations subséquentes sont donc d'abord induits par un besoin nouveau en caractérisation structurale. Deux principales techniques sont utilisées pour sonder l'ordre local et ses symétries : la diffusion des rayons X et la microscopie électronique (à une époque où le LTR la maîtrise déjà). Gratias et Portier sont spécialistes de microscopie électronique ; Comès et Deschamps s'occupent de diffusion X diffuse. De telles caractérisations requièrent des échantillons monocristallins, ce que savent faire les chimistes du groupe Collongues (IV.3.1). Chacune des parties apporte donc son savoir-faire : les chimistes en cristallogénèse, les physiciens en instrumentation.

Les superconducteurs ioniques provoquent une « effervescence » au Laboratoire entre 1970 et 1976. D'autres thèses sont menées sur les aluminates β et β' . Plus fondamentale dans ses objectifs – expliciter les « relations structure-conductivité électrique » –, la thèse de Jean-Pierre Boilot [1975] n'en est pas moins financée par EDF (1972-1975).⁹² Boilot suit la même méthode que Le Cars en collaborant plus avec la physique.⁹³ Trois thèses vont ensuite être menées jusqu'en 1980, portant ainsi à six le nombre d'études conséquentes de l'équipe sur l'alumine bêta et ses dérivés.

Les deux thèses suivantes fournissent l'occasion d'utiliser la Résonance paramagnétique électronique (RPE), nouvellement implantée au laboratoire à l'initiative de deux chercheurs exogènes : Livage (1972) et Vivien (1974). Anciens élèves de l'École, ils ont effectué une thèse avec Charles Mazières, un « collaborateur un peu lointain » de Bénard, puis sont partis en postdoc en Angleterre, à deux ans d'intervalle, le premier à Oxford, le second à Londres. Outre-Manche, ils se familiarisent avec la RPE, une technique longtemps réservée aux physiciens mais qui commence à pénétrer les laboratoires de chimie organique.⁹⁴ La RPE

⁹² L'industriel EDF paye la bourse de thèse mais fournit aussi une enveloppe de 200 000 francs sur trois ans (soit environ 150000 euros 2006) pour acheter du matériel. En fait, la thèse aboutit à une collaboration tri-partite CNRS, EDF, CGE.

⁹³ « une grande partie de ma thèse concernait des problèmes fondamentaux : comment les ions s'organisent, ordre désordre, stœchiométrie. [...] je passais 50% de mon temps au labo Collongues et 50% en physique chez Guinier et chez Jérôme, un autre groupe de physique du solide qui faisait de la RMN. » [I Boilot, 2000, p. 1]

⁹⁴ « C'était une technique réputée de physiciens et il y avait peu de laboratoires de chimie équipés de cette technique. [...] Je suis allé passer un an à l'Imperial College [Londres], dans le laboratoire de Jeff Wilkinson qui venait d'avoir le Prix Nobel quand je suis arrivé » [I Vivien, 2004, p. 5-6].

« je suis allé à Oxford pour étudier la résonance paramagnétique électronique - ce qui est un thème de physique. » [I Livage, 2001, p. 1]

permet d'étudier les électrons paramagnétiques des molécules. En effet, sous l'effet d'un champ électromagnétique incident, les électrons célibataires présentent à certaines fréquences des résonances de champs magnétiques observables. Collongues a présidé le jury de thèse de Vivien, le connaît et le recrute dès son retour (1974).⁹⁵ Livage y est entré depuis deux ans déjà. Il a proposé l'achat d'un appareil de RPE pour étudier les solides au LCAES. Collongues, pourtant peu sensible aux approches spectroscopiques, se laisse séduire par l'idée de son jeune collaborateur. Avec Livage et Vivien, la RPE devient une technique phare du Laboratoire, un nouveau savoir-faire instrumental.⁹⁶ C'est donc via des chercheurs exogènes et avec l'accord du patron que la spectroscopie et son appareil mathématique pénètrent au Laboratoire. Sans en saisir toutes les subtilités mathématiques et physiques, Collongues parie que la RPE peut être déterminante.

La première thèse à utiliser cette technique innovante est celle de Jacques Antoine [1976] sur la thématique des supraconducteurs ioniques : « Etude par RPE de la localisation d'ions étrangers dans la structure de l'alumine β ''. » La RPE nécessite l'emploi d'échantillons très purs et sous forme monocristalline. Antoine reprend donc les techniques de cristallogenèse mises au point par Le Cars mais innove en appliquant la nouvelle technique de spectroscopie à l'étude des impuretés de l'alumine β ''. La thèse est co-dirigée par Théry pour la synthèse et l'étude aux rayons X et par Vivien pour la caractérisation RPE. La thèse que Didier Gourier défend en 1980 sous le titre : « Etude par RPE de défauts localisés dans les plans de conduction de l'alumine β » poursuit dans la même voie. La technique idoine permet d'étudier la présence de défauts paramagnétiques. Ces deux thèses liées à la RPE ont conduit à « déterminer la localisation d'ions dopants dans l'alumine β et expliquer comment leur présence modifie ses propriétés électriques, étudier les défauts créés par irradiation dans l'alumine β . » [Vivien, 1999]. L'introduction de la RPE n'a pas pour autant éloigné les chimistes de leurs nouveaux alliés physiciens. Gourier travaille en relation avec le Laboratoire de physique de physique de la matière condensée, dirigé par Bernard Sapoval à l'École polytechnique (Palaiseau) où il utilise aussi la Résonance magnétique nucléaire* (RMN).⁹⁷

La dernière thèse du cycle, financée par l'Air Liquide, conduit Philippe Colombar, sous la direction de Boilot, vers « l'étude des mécanismes de conductivité dans les composés de type β et β' Al_2O_3 » [1979].⁹⁸ Elle envisage un superconducteur ionique « protonique » (H^+ conduit le courant à la place de Na^+), ce qui induit à un changement de méthode de fabrication des monocristaux par le « flux à haute température ». Il semble que le savoir-faire déployé pour la cristallogenèse de ces composés soit alors difficile à égaler de par le monde : deux

⁹⁵ « j'ai fait ma thèse dans la mouvance du laboratoire dirigé par Jacques Bénard qui était le directeur de l'École mais avec un de ses collaborateurs un peu lointain [...] Charles Mazières, avait aussi dirigé la thèse de Jacques Livage ou plutôt avait repris en cours la thèse de Jacques Livage (son premier patron était Gérard Montel et il était parti professeur à Toulouse, Jacques Livage se retrouvait sans personne). [...] Je suis [ensuite] parti en stage post-doctoral en Angleterre un an et comme justement Robert Collongues qui avait d'ailleurs été le président de mon jury de thèse, venait s'installer à l'École avec une de ses équipes venant du CNRS de Vitry, J. Livage s'est rattaché à lui un peu avant moi et j'ai suivi la même voie. C'était pour moi la solution idéale de trouver un nouveau laboratoire d'accueil avec un responsable prestigieux. » [I Vivien, 2004, p. 2].

⁹⁶ « Il avait convaincu Robert Collongues qui, comme je vous l'ai dit, était toujours favorable à laisser les gens s'exprimer quitte à les canaliser un petit peu, à acheter un appareil de RPE, ce qui était tout à fait innovant pour des chimistes à l'époque. » [I Vivien, 2004, p. 6].

⁹⁷ Gourier « travaillait d'ailleurs un petit peu à cheval sur le laboratoire et l'École Polytechnique où il y avait à l'époque un groupe de physiciens qui s'était constitué sur les conducteurs ioniques, ces matériaux qui conduisent le courant électrique par déplacement d'ions, donc un groupe de physiciens dans le laboratoire de Sapoval où il faisait de la RMN. » [I Vivien, 2004, p. 11].

⁹⁸ « Le choix du sujet répondait à une incitation industrielle... Pour l'Air Liquide l'intérêt était de pouvoir réaliser des capteurs de teneur en hydrogène stables, rapides pouvant fonctionner à une certaine température. » [I Colombar, 2003, p. 2-3].

laboratoires à peine auraient été capables de fabriquer des monocristaux d'alumine bêta stoechiométrique. Cette excellence exige des techniques de laboratoire artisanales, non conventionnelles, une lutte épique entre le valeureux thésard et la matière à terrasser sous haute température.⁹⁹ Au niveau méthodologique, cette thèse suit la même logique d'alliances. Le nombre de laboratoires en collaboration et celui des techniques employées devient impressionnant : les analyses de diffusion diffuse sont faites à Orsay avec G. Collin et Boilot, les études Raman et IR à Thiais avec G. Lucazeau et la diffusion de neutron à l'Institut Laue-Langevin avec A. Dianoux [I Colomban, 2003, p. 3]. Le chimiste est alors accueilli parmi les physiciens « comme un membre à part entière » [Colomban, 1979]. Les responsables d'équipe se rencontrent souvent pour échanger sur les sujets communs.¹⁰⁰ Par ces alliances de circonstances, les chimistes peuvent multiplier les méthodes de caractérisation (VI.2.1) : diffraction des rayons X (au LCAES), diffusion des rayons X, diffusion Raman, absorption IR, diffusion des neutrons, conductivité électrique. La thèse s'efforce de relier la structure cristalline aux ions conducteurs par un suivi dynamique qui aboutit à l'élaboration de mécanismes de conductivité. Enfin, depuis le milieu des années soixante-dix, la conduction protonique dans les solides a relancé l'intérêt pour les « piles à combustibles »*.¹⁰¹ Dans ces batteries, le solide conducteur constitue l'électrolyte séparant une anode et une cathode constituées de combustibles gazeux, hydrogène et oxygène par exemple (un schéma est fourni en annexe A.IV.2).

IV.3.3.3. Réflexions sur le « programme de recherche » de Collongues à la fin des années soixante-dix.

L'exposé descriptif du cycle des superconducteurs ioniques appelle une interprétation plus synthétique car il met en évidence un important changement de préoccupations

⁹⁹ « Philippe Colomban, chimiste, s'est consacré à l'élaboration des mono-cristaux d'alumine-β. Seuls deux groupes au niveau international savaient faire la synthèse des alumines-β : Colomban au laboratoire Collongues et Farrington chez General Electric. C'était un procédé à haute température avec quelques subtilités chimiques pour parvenir à faire l'alumine stoechiométrique. Mais il n'y eut pas de brevets sur les mono-cristaux. L'objectif était purement fondamental car les applications se faisaient sur un milieu polycristallin, céramique. » [I Boilot, 2000, p. 2]

« On portait des grands masques comme les sidérurgistes qui ouvraient les poches d'acier (Je pense que c'est un apport de Collongues qui connaissait bien le milieu en tant que responsable de la Société des Hautes Températures et Réfractaires). » [I Colomban, 2003, p. 3].

¹⁰⁰ *Les annales de la recherche à l'ENSCP, n°9*, dec 1976 : « septembre 1976 : réunion de travail à l'ENSCP avec le laboratoire de spectrochimie IR et Raman de Thiais (MM. Lucazeau et Mercier) sur les composés type alumine β. » ; « octobre 1976 : visite de M. Sapoval (Laboratoire de physique de la matière condensée de l'École Polytechnique). Mise au point de d'un travail en commun de RMN sur les superconducteurs ioniques. »

¹⁰¹ « BBV : Quel était l'intérêt industriel de la conduction protonique en 1975? – PhC : Elle était alors envisagée comme une alternative énergétique. On était après le premier choc pétrolier et les énergies propres étaient désirées. C'est l'époque de la mise au point du Nafion© par Dupont pour les piles à combustibles du programme Gemini et l'on voulait des matériaux susceptibles de fonctionner à plus haute température pour éviter les catalyseurs de platine. Pour l'Air Liquide l'intérêt était de pouvoir réaliser des capteurs de teneur en hydrogène stables, rapides pouvant fonctionner à une certaine température. Avec la Thonson-CSF (G. Velasco et M. Croset) je développais plus tard de tels capteurs "microioniques". Ce fut les premières réalisations d'un équivalent ionique de la microélectronique (*La Recherche*, 14 octobre 1983, 1292-1296). En Europe nous étions deux à travailler sur la conduction protonique, moi (!) et le laboratoire d'Odensee au Danemark dirigé par Johs Jensen, le "patron" de J.S. Lundsgaard. Avec Jensen j'organisais en 1981 un colloque à l'École Polytechnique où je venais d'arriver pour monter une équipe de Chimie du solide [...] Ce colloque était financé par une fondation danoise et l'Ambassade de France. Il fut le premier d'une série qui après internationalisation continue encore. Johs Jensen fut vraiment la cheville ouvrière du développement des travaux sur les piles à combustibles "propres" en Europe. » [I Colomban, 2003, p. 2].

épistémologiques et instrumentales au sein du groupe Collongues, entre le début des années soixante et les années soixante-dix. En 1962, l'objectif est avant tout structural et conduit à une comparaison entre familles de composés : d'un côté, les aluminates, mal connues, de l'autre, les ferrites, étudiées au Laboratoire durant la vogue des ferrites magnétiques des années 1950 (II.1.2.1). Le choix des aluminates est motivé par une parenté structurale avec les ferrites : c'est donc la réutilisation de connaissances acquises précédemment – sur les ferrites – qui oriente le choix des aluminates. Pour ce faire, la diffraction des rayons X sur poudres constitue l'outil de base des chimistes pour étudier les échantillons polycristallins, qui sont synthétisés au Laboratoire. Elle offre une moyenne nanométrique sur l'organisation des plans atomiques des cristaux. La comparaison systématique des dérivés de l'alumine bêta avec les dérivés des ferrites conduit à l'élaboration de diagrammes de phase. Ceux-ci permettent en effet de tracer un schéma associant une structure cristalline à une température (en ordonnée) et une composition chimique (en abscisse) de manière continue. Cette carte à deux dimensions définit des domaines d'existence des phases cristallines thermodynamiques. L'établissement des diagrammes de phase constitue l'une des principales activités de la communauté à cette époque.¹⁰² Les caractérisations physiques ne sont pas systématiques : aucune mesure de conductivité électrique n'est réalisée sur l'alumine bêta alors qu'elle était techniquement possible. Si la détermination structurale fait partie de la routine de l'équipe au début des années 1960, ce n'est pas le cas des caractérisations physiques.

En 1967, deux ans après le quatrième article de Théry sur le sujet, lorsque les chercheurs de *Ford* publient les deux articles dans des revues américaines, appliquées au domaine de l'énergie, rien ne se passe au Laboratoire. Soit les articles sont remarqués mais Collongues ne juge pas primordial de repartir sur le sujet, soit, plus probable, ils ne sont pas remarqués car la veille « technologique » nécessaire aurait demandé trop d'effort ou n'était tout simplement pas le but des universitaires français. Ce n'est qu'en 1970, trois ans après les États-Unis, que le sujet revient aux oreilles de Collongues par la voix industrielle. D'une position, où l'équipe a la main en 1962, résultant d'une logique propre de réinvestissement des savoir-faire internes après un effet de mode – les ferrites –, on passe à une demande d'industriel français (CGE) suivant la dynamique internationale – surtout états-unienne –. D'une analyse structurale polycristalline de routine chez les chimistes de la *Chaudronnerie*, on passe à un couplage des études structurales et physiques rendues possibles par la cristallogénèse. Deux ans sont encore nécessaires à l'équipe pour produire et publier deux articles [Le Cars & al., 1972a ; 1972b]. Entre le coup de tonnerre des chercheurs de *Ford* et la réponse des Français – dans des revues françaises – s'écoulent donc cinq longues années. Pour n'avoir pas voulu, pu ou su appliquer la relation structure→propriétés dès 1962, l'équipe Collongues se trouve donc distancée et doit faire un effort durant les années soixante-dix pour se remettre dans la course internationale.

Tout n'est pas perdu néanmoins parce que, entre-temps, le Service a développé un nouveau savoir-faire, la cristallogénèse des composés ioniques, qui est désormais indispensable pour des études structurales fines. Celles-ci sont pour la plupart hors de portée des chimistes au cours des années soixante-dix. Pour y remédier, le Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide va établir des collaborations étroites avec physiciens, spectroscopistes et métallurgistes. La structure atomique (locale) est accessible par diffusion de rayons X ou microscopie électronique. Celle-ci peut aussi être développée par des chimistes comme au LTR dès 1970 (IV.2.3.2). Au niveau stratégique, Collongues profite de la création du LCAES pour recruter des chercheurs brillants et sait par la suite écouter leurs propositions. L'implantation de la RPE en particulier constitue une nouvelle rupture

¹⁰² Le cas du LCM dirigé par Flahaut est paradigmatique (IV.1.2) mais c'est une constante qu'on retrouve ailleurs. Caro décrit les pratiques du LTR vers 1960 : « Nous faisons encore beaucoup de diagrammes de phase à l'époque. » [I Caro, 2005, p. 3].

instrumentale au Laboratoire. À la même époque, le LTR utilise aussi la RPE grâce aux équipements collectifs de Bellevue (IV.2.3.2). Cette technique spectroscopique permet d'étudier avec une précision accrue le comportement des défauts élémentaires dans les structures cristallines. Or les défauts chimiques (qui affectent la composition et la structure) constituent, depuis la thèse de Collongues sur les composés non stœchiométriques, l'un des leitmotivs de sa réflexion scientifique. La RPE permet de passer d'une approche thermodynamique (type Wagner et Schottky) non instrumentale – les défauts sont difficiles à étudier précisément avec la diffraction des rayons X sur poudres – à une expérimentation extrêmement mathématique. La RPE nécessite une approche quantique et symétrique extrêmement formalisée au niveau mathématique pour être correctement interprétée.

En une décennie (1962-1972), la méthode Collongues évolue sur trois points au moins : 1°) avènement de la cristallogénèse à partir de 1964 ; 2°) évolution d'un diptyque synthèse-structure vers l'étude de la relation structure→propriétés ; 3°) la référence aux applications opère un glissement : les réfractaires cèdent leur place, centrale, aux superconducteurs ioniques. (1) rend possible des études plus fines de la relation structure→propriétés : anisotropie et localité (au niveau de l'angström*) mais ce n'est pas toujours une condition nécessaire. Pour assurer la réalisation de (2), le Laboratoire est obligé de s'associer à des laboratoires spécialisés tout en développant partiellement la RPE. Le glissement opéré par (3) éloigne l'équipe du cœur de la communauté des hautes températures (propriétés thermiques) pour l'orienter vers celle de physique (propriétés électriques). Ce qui semble constant sur toute la période est la capacité de Collongues à réutiliser et à faire réutiliser les savoir-faire acquis précédemment lorsque le domaine étudié change. La plupart du temps, ces réutilisations ont à voir avec les instruments : aussi il s'agit bien du type *instrumental-historique*. C'est à la fin du cycle de recherche sur les superconducteurs ioniques que Collongues [1979] précise son « programme de recherche » et ce qu'il entend désormais par « chimie des matériaux » (III.2.2).

À ce moment-là, le Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide s'est constitué un réseau parisien de laboratoires complémentaires (non concurrents)¹⁰³ avec qui il collabore : spectroscopie (Thiais), physique (Palaiseau, Orsay), métallurgie (Orsay, Vitry).¹⁰⁴ Des industriels privés ou publics favorisent des collaborations bi ou tri-partite au sein du réseau universitaire. Le réseau de laboratoires universitaires, financés par des projets industriels, s'intègre à « la communauté de l'alumine bêta », ensemble international impliquant d'énormes intérêts économiques (automobile et énergie). Cette communauté se transforme à partir des années quatre-vingt en une communauté des conducteurs ioniques, plus diffuses. La revue internationale *Solid State Ionics* est éditée à partir de 1980, à Amsterdam. Les matériaux dérivés du Nafion[®] (Du Pont de Nemours) et des Nasicons ont remplacé l'alumine bêta. Ce sont des phosphates ou phospho-silicates contenant des ions Na⁺ superconducteurs mais il semble que la fièvre d'après-1967 ne soit plus là. À Orsay et Palaiseau, les laboratoires de physique des solides poursuivent encore l'effort durant quelques années (1978-1984).¹⁰⁵

¹⁰³ Il est tout à fait significatif que le LCAES ne collabore pas avec le LTR, qui dispose pourtant en partie des savoir-faire dont il a besoin, probablement parce qu'ils sont en concurrence au sein de la communauté nationale de chimie du solide.

¹⁰⁴ Au niveau universitaire, national : « il y avait des séminaires organisés ici à Polytechnique par Bernard Sapoval et Hervé Arribart. », international : « C'est un autre aspect important : il y avait une compétition internationale, essentiellement avec les Américains, avec les gens de General Electric – Roth – et les gens de Bell Telephone. J'ai commencé à participer en 1976 Schenectady ; 1979 Lake Geneva (USA), Gatlinburg (Tennessee) en 1981, Grenoble en 83, Lake Tahoe en 1985 ; Garmisch en 1987. Outre cette série des *Solid State Ionics*, il y avait Rome (1976) et Saint-Andrews en Ecosse, en 1978. » [I Boilot, 2000, p. 1-2].

¹⁰⁵ « Pour revenir aux applications, les nasicons ont eu moins d'intérêt car ils sont moins stables, ils résistent moins bien au sodium liquide. Ils n'ont pas eu le succès de l'alumine bêta mais des gens travaillent encore

Au LCAES en revanche, 1980 marque la fin du cycle décennal de recherche sur les superconducteurs ioniques. Qu'est-ce qui a décidé de l'arrêt de ces recherches ? Tout d'abord, les permanents du laboratoire ont le sentiment d'avoir fait « le tour de la question » et ne lancent pas vraiment sur les Nasicons. La plupart des thésards investis sur l'alumine bêta n'ont pas été recrutés au Laboratoire : Boilot et Colomban rejoignent le Laboratoire Sapoval à Palaiseau (1981), Le Cars est parti dans l'industrie, Antoine est devenu journaliste scientifique. Seul Gourier est resté chez Collongues où son apport est plus spectroscopique que chimique – il peut donc sans problème étudier des défauts dans d'autres matrices cristallines –. Troisième élément, l'alumine bêta ne porte plus les espoirs des industriels : la synthèse de monocristaux parfaits requise pour les électrolytes solides n'est pas économiquement viable à grande échelle, dans les conditions du marché de l'époque. De plus les matériaux s'usent vite. Les industriels envisagent décident que l'horizon de l'alumine bêta est bouché et changent de cap, vers d'autres matériaux.¹⁰⁶ Quelques Actions thématiques programmées (ATP) du CNRS encore et puis l'alumine bêta quitte sans gloire l'arène médiatique au début des années quatre-vingt. Même le deuxième choc pétrolier de 1980 ne fournira pas un électrochoc suffisant pour la ressusciter. Un quatrième élément, local, favorise l'arrêt des superconducteurs ioniques.

En 1979, quatre chercheurs (Vivien, Théry, Lejus, Kahn-Harari) impliqués dans le cycle des superconducteurs ioniques se sont amusés à insérer des terres rares dans une matrice d'alumine bêta. Après plusieurs synthèses, ils ont mis en évidence, grâce à la RPE et à la spectroscopie optique, un effet quantique laser très intéressant dans le composé solide de formule $\text{LnMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (LMA). C'est l'enthousiasme dans l'équipe. Convaincus par R. Caillat de l'Agence nationale pour la valorisation de la recherche (ANVAR), l'équipe dépose un brevet pour protéger l'invention et se lance sur le sujet. Deux ans plus tard, après avoir réussi la cristallogénèse du LMA, déterminé sa structure et caractérisé ses propriétés, ils publient un article retentissant intitulé « Preparation, structure, optical and magnetic properties of lanthanide aluminate single crystals ($\text{LnMgAl}_{11}\text{O}_{19}$) » dans *Journal of Applied Physics* [Kahn & al. 1981]. Militaires (DGA) et industriels (CEA, optique) se montrent très intéressés. C'est le lancement d'un quatrième cycle décennal de recherche, sur les matériaux lasers, largement financés par les industriels (public et privé) [Teissier, 2006]. Même si Collongues n'est pas scientifiquement moteur, on reconnaît pourtant bien là l'empreinte du type « instrumental-historique » qui associe un thème traditionnel (alumine bêta) à une double compétence technique (cristallogénèse et RPE). La recette fonctionne si bien que le cycle de recherche ouvert il y a plus de vingt-cinq ans dure encore aujourd'hui au Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide.

dessus. Il y a eu beaucoup de travail sur cette famille : diversité de compositions et de phases. Elle présente un intérêt pour la compréhension des paramètres fondamentaux du solide mais moins que l'alumine bêta. – *BBV*: *Rétrospectivement considérez vous que ce travail sur les nasicons a été positif?* – *JPB*: Oui on aurait peut-être pu arrêter un peu plus tôt. On a travaillé là-dessus de 1978 à 1984 mais toujours en parallèle avec l'alumine bêta. C'est un travail qui se faisait à Polytechnique où je suis venu en 1981. C'est un sujet qu'on a développé ici avec Colomban, toujours en liaison avec les physiciens du solide (Collin) d'Orsay dans le groupe de Robert Gomès qui avait pris la succession de Guinier. » [I Boilot, 2000, p. 3].

¹⁰⁶ « l'alumine bêta [...] on avait l'impression d'en avoir fait un petit peu le tour : il n'y avait plus les débouchés industriels. » [I Vivien, 2004, p. 6].

« il y eut une effervescence de 1970 à 76. Le pessimisme est venu après. [...] C'est faux de dire qu'il y avait un pessimisme dans les années 70. Pour les années 80, c'est une autre histoire. Plus de problème d'énergie, d'autres problématiques sont arrivées : utiliser des systèmes. On savait que les batteries sodium-soufre ne seraient pas commerciales. Elles ne le seront peut-être jamais. Donc du point de vue industriel, c'était un tout petit peu moins motivant. » [I Boilot, 2000, p. 2]

« on avait compris qu'on ne pourrait pas exploiter l'alumine *beta* au niveau industriel : il y avait un problème de réalisation à grande échelle, de matériaux parfaits, sans défauts. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 5]

Interlude où la cristallogenèse entre en chimie du solide.

Si avant-guerre la cristallogenèse n'est pas une spécialité des chimistes, elle ne devient pas pour autant leur souci principal en France après-guerre. Cette assertion pour abrupte qu'elle soit n'est pas évidente. Avant la Première Guerre mondiale, en 1912, à Berlin, trois physiciens expérimentaux s'amuse à faire interagir des rayons X avec un cristal. Ne sachant que choisir, Lauë, Friedrich et Knipping demandent l'avis des minéralogistes du laboratoire d'à côté, dirigé par P. Groth. Ils emploient d'abord un monocristal de sulfate de cuivre, croyant que la fluorescence peut avoir une influence, avant d'opter pour du sulfure de zinc [Ewald, 1962]. Les monocristaux ioniques sont alors simplement ramassés dans la nature. À la même époque, les métallurgistes fabriquent des métaux et alliages sous forme monocristalline par un chauffage convenable, l'un des germes croissant beaucoup plus vite que les autres. Cette méthode simple, sans « changement d'état », n'est pas possible pour les oxydes.¹⁰⁷ Vers 1950, Chaudron et ses élèves travaillent couramment sur des « cristaux uniques » d'aluminium (II.2.1.4). Mais c'est surtout par la physique des semi-conducteurs que se développe la cristallogenèse au cours des années 1940 aux États-Unis. Peu après, les physiciens français du CNET entreprennent eux-aussi la fabrication de monocristaux de germanium (I.3.2), qu'ils maîtrisent finalement grâce à deux chimistes allemands (1950-1953) [Licoppe, 1996]. Si les fundamentalistes de l'École normale supérieure s'efforcent d'obtenir des monocristaux de germanium, ce n'est pas pour la beauté d'une synthèse à laquelle ils sont peu sensibles mais parce qu'ils en ont besoin pour les caractérisations physiques. Désormais, pour les études physiques les plus fines, les poudres polycristallines ne suffisent plus parce qu'elles moyennent les anisotropies éventuelles et que les inhomogénéités entre mono-domaines induisent des effets indésirables (joints de grain ou porosité). Ce sont donc les physiciens qui au cours des années 1950 sont les plus enclins à travailler sur des monocristaux de taille centimétrique. À Grenoble, chez Néel, on commence à employer certains monocristaux à partir de 1951 pour la diffraction des neutrons* et l'étude des propriétés magnétiques. Cependant les physiciens français sont moins experts en cristallogenèse que les industriels états-uniens. Ainsi, quand Bertaut commence à travailler sur les ferrites de terres rares puis sur les grenats (1954), il synthétise uniquement des polycristaux. En 1954, Bernd Matthias, chimiste aux Laboratoires Bell, est accueilli à Grenoble, où il passe l'été pour se familiariser avec les ferrites de terres rares. Lorsqu'il rentre aux États-Unis, il en réalise assez rapidement la cristallogenèse au plus grand dam des « Grenoblois », qui ne savent pas fabriquer à ce moment-là de monocristaux d'oxydes métalliques. Le premier ressentiment passé, ils effectuent par la suite (1957-1958) de nombreux voyages aux États-Unis pour en rapporter le « savoir-faire » [Pestre, 1990, p. 101].

Jusqu'au début des années 1960, la cristallogenèse reste une activité confidentielle en France, confinée à quelques laboratoires de physique ou de cristallographie. Les chimistes s'y intéressent peu ou pas. En septembre 1963, le deuxième symposium d'Asilomar sur les hautes températures (V.1) place les monocristaux au cœur des nouvelles interrogations. Les rapporteurs en font un compte rendu oral devant la Commission des hautes températures puis

¹⁰⁷ « La réalisation d'expériences sur monocristal [...] est une étape que les métallurgistes avaient franchi depuis longtemps [par rapport aux années 1960]. De nombreuses méthodes d'élaborations de monocristaux étaient connues [...]. Dans un échantillon polycristallin soumis à des contraintes thermiques ou mécaniques convenables, un cristal se développe au détriment des autres. C'est la recristallisation secondaire, très utilisée pour les matériaux métalliques mais pratiquement inexistante pour les oxydes. » [Collongues, 1979, p. 54].

écrit dans le premier numéro de la *Revue des hautes températures et des réfractaires*.¹⁰⁸ Cependant, la question intéresse beaucoup plus largement puisqu'en janvier le CNRS a lancé deux Recherches coopératives sur programmes (RCP) sur ce thème. La RCP n°6 « synthèses cristallines » formalise une collaboration antérieure de Marc Foëx à Montlouis avec le « département de Physique cristalline » de la faculté des sciences de Montpellier. Le projet émane des opticiens, dépend de la section « minéralogie, optique, physique moléculaire » et a pour objectif à terme la création d'un centre de cristallogenèse à Montpellier. « Mademoiselle Vergnoux » dirige la RCP et le Département de physique cristalline.¹⁰⁹ À l'heure d'un premier bilan en 1966, trois objectifs ont été atteints. Premièrement, un « Centre de documentation sur les synthèses cristallines » permet depuis 1965 des échanges d'informations entre « 175 laboratoires fabriquant des monocristaux, en France et dans 10 pays étrangers ». La cristallogenèse se déploie donc sur un vaste réseau, qui intéresse de nombreux chercheurs en « optique, minéralogie, électronique ». Étonnamment, la « chimie minérale » n'est pas mentionnée alors qu'à la même époque Foëx participe au projet et que le Service des réfractaires de Collongues travaille à la cristallogenèse des oxydes. Doit-on y voir un simple oubli, un cloisonnement hermétique entre physiciens, cristallographes d'un côté et chimistes de l'autre, un phénomène minoritaire chez les chimistes ? Deuxièmement, la RCP a permis de poursuivre une activité du département de physique cristalline : la « cristallisation à partir de solution », qui a permis à température ambiante de produire « formiates », « bichromates » et « acétates » d'alcalins et alcalino-terreux. Enfin, le troisième point concerne les « équipements à haute température », installés dans les deux laboratoires : un « four à vide à fluorures avec éléments chauffants pour méthode Stockbarger » et un four « Verneuil » pour fabriquer des cristaux de rutile (TiO₂) « atteignant 1 à 2 cm³ » [RCP, 1966, p. 33-34].

Simultanément, la RCP n°15 « réalisation de monocristaux sous pression » cherche à perfectionner la cristallogenèse à partir de « solutions » sous haute pression. Multidisciplinaire – sections de minéralogie, optique, mécanique, chimie minérale –, elle associe trois laboratoires de Bellevue : des échanges thermiques (Cabannes), des terres rares (Loriers) et des hautes pressions (B. Vodar) sous la direction de Vodar. Deux types de synthèse sont menées : par voie hydrothermale et en solution dans des sels fondus. La voie hydrothermale a permis de fabriquer dans une « autoclave » des cristaux de carbonate de calcium sous forme « calcite » à partir de solutions aqueuses de chlorure chauffées entre 350 et 500°C et pressées sous 1000 bars. La croissance cristalline est lente : 0,05mm par jour. Les résultats semblent meilleurs dans le cas des sels fondus qui conduisent à des monocristaux : zircon et oxyde de hafnium (15*15*2mm) ; vanadate d'yttrium ; calcite (quelques millimètres cube) [RCP, 1966, p. 52-53].

L'exemple des deux RCP montre que les chimistes n'en sont ni à l'initiative, ni aux commandes. Néanmoins, Trombe et ses collaborateurs (Foëx et Loriers) y participent activement. Ce sont d'ailleurs plus les physiciens que les cristallographes qui dirigent la manœuvre : la nécessité d'étudier les propriétés physiques, en particulier « optique » et « électronique », constitue la force motrice de ces deux RCP. Les techniques de hautes

¹⁰⁸ « Divers rapports font apparaître l'importance accrue des produits purs et monocristallins de haute définition chimique et physique pour la réalisation de nombreuses études relatives aux hautes températures. Ces études intéressent des domaines très variés qu'il s'agisse, par exemple, des hauts vides de l'espace ou des pressions très élevées. » [RHTR, 1964, p. 173]. Néanmoins aucun des titres de rapports ne contient le mot « monocristal » ou « monocristallin ».

¹⁰⁹ Le « département de Physique cristalline [...] (1 cristallographe et 7 spécialistes d'optique du solide) avait demandé, dès 1962, la création d'un Centre de synthèses cristallines à Montpellier ; cette demande a été approuvée par la Commission d'optique du Comité national de la recherche scientifique du CNRS et les commissions chargées du rapport de conjoncture préparatoire au V^e plan ». La RCP doit constituer la première étape vers la mise en place de ce centre de cristallogenèse à Montpellier [RCP, 1966, p. 33-34].

températures y occupent une place de choix : solaire, plasma, électrique ; trois des cinq laboratoires impliqués : Trombe, Foëx, Cabannes sont partie prenante de la Commission de chimie des hautes températures (V.1). Même si Collongues ne participe pas aux RCP, celles-ci développent certaines techniques que lui-même utilise. La zircone, ici aussi, est soumise à la cristallogénèse. Les hautes températures ne constituent par pour autant le seul moyen de fabriquer des monocristaux. Deux autres voies sont explorées : cristallisation à partir de solution à température ambiante et synthèse hydrothermale (sous haute pression). Ces deux voies ne sont pas explorées par les chimistes universitaires. Le recours aux hautes pressions semble être un apport du Laboratoire des hautes pressions de Bellevue (Vodar). Les chimistes français ne s'y aventurent pas vraiment durant la première moitié des années 1960 malgré quelques incitations. Ainsi, le rapport de conjoncture de la section chimie minérale préconise « l'association des *hautes températures et des pressions élevées* » pour des domaines aussi divers que les « réactions solide-gaz », les « transformations de l'état solide » et la « synthèse de nouveaux réfractaires » [RC CNRS, 1964, p. 70].

À partir des années 1960, physiciens et chimistes se rencontrent autour de la cristallogénèse des composés ioniques. Les premiers sont moteur, poussés par des impératifs (internationaux ?) de caractérisation tandis que les seconds participent volontiers à cette initiative mais dans un autre état d'esprit. Plus que les physiciens, obnubilés par les propriétés physiques, ce qui intéresse les chimistes, c'est le défi technologique présenté par la cristallogénèse. Quand ce défi est remporté, les chimistes essaient de faire la publicité de la synthèse de monocristaux. Certains – comme Collongues et son école – s'intéressent aussi aux questions théoriques de croissance cristalline, qui sont liées à la cristallogénèse.¹¹⁰ Si la cristallogénèse est si cruciale, c'est qu'elle permet aux chimistes de se rendre indispensables aux physiciens. L'un des nœuds de la chimie du solide se situe donc là : la cristallogénèse est un lieu de rencontre des physiciens et des chimistes au cours des années soixante. En effet, les chimistes, sensibilisés par des physiciens avides de caractérisation, se frottent à la synthèse de gros monocristaux, qui rendent ces caractérisations possibles, et en deviennent experts. Des collaborations effectives sont rendues palpables par les Recherches coopératives sur programme mais existent indépendamment d'elles (LTR, LCAES). Dans ce duo, le chimiste est investi d'une originalité chimique, qu'il cherche à cultiver,¹¹¹ mais s'entiche bientôt des caractérisations physiques. En quelque sort, il se réapproprie le monocristal, venu de la physique. Au cours des années soixante, la cristallogénèse, étape clé de l'étude des composés minéraux, approfondit la relation structure-propriétés : le monocristal révèle désormais, sans fard, l'anisotropie des propriétés physiques et évince les imperfections des poudres (joints de grain, porosité).¹¹² Une relation plus directe, plus intime relie alors une structure cristalline, homogène et observable, à des propriétés mesurables. Le chimiste a accompli une première

¹¹⁰ Par exemple, Collongues réalise un documentaire d'une vingtaine de minutes en 1969 avec Revcolevschi intitulé *Elaboration de monocristaux réfractaires à hautes températures* [Collongues, 1969]. En 1966, Collongues organise un colloque sur « Les mécanismes de la fusion et de la solidification » [RA CNRS, 1966, p. 134]. (V.1.2.2.).

¹¹¹ « Ce que m'a appris l'alumine bêta c'est qu'il faut faire de la chimie. C'est le matériau qui est intéressant. C'est le message le plus important. Toutes les avancées qu'on a eues au laboratoire Collongues, c'est parce qu'on a su faire de la synthèse de matériaux avant et mieux que les autres. Notre premier travail est de faire de l'innovation en matériaux » [I Boilot, 2000, p. 3].

¹¹² « La réalisation d'expériences sur monocristal apparaît [...] comme une étape essentielle de la connaissance du Solide. [...] Pour l'étude des propriétés mécaniques, physiques ou chimiques, l'élaboration de cristaux s'est avérée nécessaire. » puis « Certains [monocristaux] présentent une anisotropie structurale » qui conduit à une « extraordinaire anisotropie de toutes les propriétés : physiques (paramagnétisme), mécaniques (microdureté), chimiques (sensibilisation à l'hydratation). » [Collongues, 1979, p. 54, p. 59].

mue en se rendant indispensable aux physiciens des solides et en étudiant plus systématiquement les propriétés physiques.

Au sein de la communauté du solide ionique, la cristallogénèse prend de l'importance au cours de la deuxième moitié de la décennie soixante. Débats théoriques et applications potentielles y sont alors intimement liés. Trois « événements », marquant au niveau national, scandent la période (1966-1968). Tout d'abord, la Commission des hautes températures et l'Association belge pour favoriser l'étude des verres et des composés siliceux organisent un colloque international sur les « mécanismes de la fusion et de la solidification », en juillet 1966, à Paris. Collongues en assure l'organisation pratique à l'École de chimie.¹¹³ Cent quatre-vingts participants de douze nationalités se réunissent pour débattre de quatre sujets principaux : « aspects généraux des phénomènes de fusion et de solidification » (5 communications) ; cas des « systèmes métalliques » (17) ; des « composés minéraux et organiques » (12) ; « états vitreux » (9). Chacun des sujets est introduit par une « conférence », prononcée par une sommité européenne : A.R. Ubbelohde (Londres), A. Schneider (Clausthal-Zellerfeld), G. Borelius (Stockholm), E. Plumat (Charleroi). L'étude de solides très divers : métaux, minéraux, organiques et vitreux, la présidence de Chaudron et la présence de conférenciers comme Ubbelohde ou Borelius placent clairement ce colloque dans la tradition de chimie de l'état solide. Il n'est donc pas étonnant de retrouver traitées ensemble questions théoriques et technologiques, composés modèle et appliqués. On comprend dès lors que la DGRST finance l'organisation du colloque [RIHTR, 1966, t3, N°4, p. 462].

Ensuite, la deuxième session du Séminaire de l'état solide (1967-1968) est entièrement consacrée à la « croissance de composés minéraux monocristallins ». Michel, qui préside le thème, l'introduit en précisant deux choses intéressantes : de manière générale, le séminaire permet d'établir de « fructueux contacts [entre] chimistes de l'état solide, physiciens et théoriciens du solide » ; le choix du thème de l'année universitaire 1967-1968 résulte d'un constat de la première session, le besoin en monocristaux pour obtenir des « données physiques [...] suffisamment précises ». Trois des onze exposés traitent de questions générales (théoriques) de croissance cristalline (B. Mutaftschiev, S. Goldsztaub, C. Belouet) tandis que les autres présentent un synthèse monocristalline d'oxydes (7) ou de chalcogénures (1). La plupart ont recouru aux hautes températures : oxydes tungstique WO_3 (R. Le Bihan) et ferrique (sous forte pression de gaz, H. Makram) au Laboratoire du magnétisme et de physique du solide (Bellevue) ; rubis et grenat pour applications laser (P. Margotin, CGE) ; oxydes mixtes ABO_3 (Brusset, ENS) ; oxydes de terres rares, $MnLnO_3$ (G. Buisson, CEN Grenoble) et $PrAlO_3$ (Anthony). Le Laboratoire des terres rares (G. Collin) développe le « transport en phase gazeuse » pour fabriquer des chalcogénures binaires et ternaires tandis que le CNET (M. Marais) a recours à la synthèse hydrothermale pour le corindon et le rubis.

Enfin, en janvier 1968, la section 9 du CNRS, « cristallographie et minéralogie », a pris l'initiative de créer le Groupe français de croissance cristalline (GFCC) afin « de favoriser les relations entre chercheurs de nombreuses disciplines intéressées par les problèmes de croissance cristalline et de stimuler les recherches dans ce domaine, tant fondamentales qu'appliquées. » Dekeyser, son premier président, est associé à Vergnoux et Mutaftschiev [RA CNRS, 1968, p. 152]. L'année suivante, deux laboratoires de chimie minérale (Caen et Orléans) participent à la réunion du GFCC [RA CNRS, 1969, p. 202].

La cristallogénèse constitue l'un des nœuds essentiels dans la construction de la chimie du solide française. Au cours des années 1950, les physiciens français – passant de la

¹¹³ Le comité d'organisation est d'inspiration franco-belge (mais non francophone) : Collongues et Chaudron (président) associés à Willy Dekeyser (Gand) et Marcel Lepingle (directeur de l'École supérieure du verre à Charleroi).

physique du métal à la physique des solides – s'intéressent de plus en plus aux composés ioniques, en particulier aux oxydes, à cause de leurs propriétés physiques intéressantes. Par exemple, les ferrites grenats synthétisés par Bertaut permettent de confirmer la théorie du ferrimagnétisme, défendue par Néel depuis 1947. En raison des applications potentielles que ces nouveaux composés font miroiter, des industriels (CNET, CGE, CEA) montent aussi au créneau. L'obtention d'informations plus fines – au niveau atomique – nécessite le recours aux monocristaux. Comme ceux des oxydes sont difficiles à fabriquer, les physiciens – et dans une moindre mesure, les cristallographes – font un premier pas en direction des chimistes de l'état solide. Cette démarche, motivée par la recherche d'un savoir-faire en synthèse, stimule l'intérêt des chimistes français pour la cristallogénèse. En quelques années (1963-1966), ceux-ci font un effort considérable pour combler un « retard » technique qu'ils constatent par rapport aux États-Unis. Ils se montrent très efficaces, en partie grâce au savoir-faire accumulé en chimie des hautes températures, et peuvent collaborer avec les physiciens, en forte demande de matériaux bien définis. De leur côté, les physiciens maîtrisent les techniques de hautes pressions, qui leur permettent de développer des synthèses à partir de solutions liquides. Mais l'alliance multidisciplinaire est scellée : les chimistes sont désormais considérés comme indispensables pour la cristallogénèse. Non pas que les collaborations n'existaient pas par le passé (III.4.1) mais elles deviennent quasiment indispensables pour tous les laboratoires.

IV.4. Du contournement à la clôture d'un territoire ou le type « systématique-élémentaire » de l'école bordelaise (1956-1986)

Contrairement aux trois premiers laboratoires-types, Hagenmuller n'est pas issu de la tradition des hautes températures mais de la chimie des solutions. D'abord orthodoxe en *Chrétienté*, avec un penchant pour les mathématiques, sa rupture avec le maître déstabilise sa position de favori et le place parmi les *outsiders* de la chimie minérale. Elle affirme sa posture de révolte, ce qui le distingue radicalement des trois autres – Flahaut, Trombe, Collongues – héritiers d'une continuité épistémologique et sociale vis-à-vis de leur famille respective. Sa stratégie de développement s'en trouve affectée.

IV.4.1. De Rennes à Bordeaux : une stratégie « élémentaire », multidisciplinaire et internationale (1956-1976)

IV.4.1.1. Les débuts en chimie minérale à Rennes : le mythe de la « rupture » avec la *Chrétienté*

En novembre 1956, Hagenmuller est nommé maître de conférences en chimie minérale à la faculté des sciences de Rennes. Il y remplace Rohmer, l'un des premiers élèves de Chrétien (1939), alsacien lui-aussi, qui a obtenu un poste à Strasbourg. Sur les bords de la Vilaine, Rohmer laisse Jacques Prigent en fin de thèse. Prigent et Hagenmuller vont former deux équipes de chimie minérale en parallèle (VII.1.1). Hagenmuller, jeune professeur de trente-cinq ans, se trouve désormais libéré de la tutelle du maître avec qui il s'est brouillé. Il

ne compte pas rester les bras croisés. La notice des titres et travaux qu'il rédige en 1960 permet de préciser l'orientation de l'époque rennaise. Le contenu de la notice suggère plus une transition douce, entre 1956 et 1960, qu'une rupture brutale avec la *Chrétienté*. Certes, le « souci constant [...] d'appliquer systématiquement la mesure physique à la résolution des problèmes d'ordre chimique » [Hagenmuller, 1960] rompt avec la vision défensive du maître pour « rester chimiste » (III.2.1.1). Mais cette orientation physico-chimique, loin d'être personnelle, correspond comme il l'écrit lui-même à « l'évolution moderne de la chimie minérale ». Loin de l'image du récit légendaire, il n'est pas le visionnaire qui s'élève contre vents et marées (III.1.1). Il se réclame même d'une continuité par rapport à son prédécesseur à Rennes, Rohmer. Hagenmuller lance ses premiers étudiants rennais suivant deux voies distinctes : la chimie des sels et des complexes, en essayant de systématiser le comportement des solutions et des « recherches relatives à des composés solides minéraux ». ¹¹⁴ Par cette dualité entre solide et solution, il s'inscrit complètement dans la tradition chimique d'après-guerre (II.1.1).

D'ailleurs, aussi étrange que cela puisse paraître après avoir entendu les témoignages a posteriori, le Laboratoire de chimie minérale de Chrétien suit à la Sorbonne une évolution similaire (III.2.1.2). En 1963 déjà, il est scindé en deux « groupes » : l'un, sous la responsabilité de Chrétien, traite de « chimie dans les solvants non aqueux » tandis que l'autre, sous la responsabilité de William Freundlich, prend le nom de « chimie dans l'état solide » [RA CNRS, 1963]. Cette formulation – chimie dans l'état solide –, unique à ma connaissance, constitue un nouvel avatar de la chimie de l'état solide. D'une manière très similaire à Chaudron trente ans plus tôt, Freundlich a orienté une moitié de ses étudiants vers l'étude des « oxydes ternaires des métaux de transition » et l'autre moitié vers des « systèmes ternaires métalliques ». Dans le cas Freundlich, le passage du ionique au métallique s'effectue par le truchement de la « réduction des oxydes ». Ainsi, par une logique propre à la chimie minérale, qui divise les réactions chimiques entre oxydo-réductrice et acido-basique, le groupe Freundlich parvient à la même division du travail qu'en *Chaudronnerie*. Les préoccupations sont surtout chimiques (réactivité et réactions) et structurales (la structure est perçue ici comme une propriété physique). Néanmoins, Chrétien – comme Chaudron – reste fermement accroché à la division traditionnelle d'après-guerre puisqu'il crée une *Revue de chimie minérale* (Gauthier-Villars) en 1964. La revue, en langue française, publie aussi bien des articles de chimie en solution que sur les solides minéraux. ¹¹⁵

L'exemple des laboratoires Chrétien et Hagenmuller au début des années 1960 confirme la tendance observée dix ans plus tôt pour la plupart des laboratoires de chimie minérale : un éclectisme qui permet d'étudier solides et solutions ensemble (II.1.1.3). Cependant, il montre aussi que sous le nom général du laboratoire se cachent des divisions – services au CECM, groupes à la Sorbonne – et des spécialisations – chimie des hautes températures, chimie dans l'état solide –. S'il fallait chercher un commencement d'institutionnalisation de la chimie du solide, c'est dans ces divisions internes qu'apparaissent les premières formulations, au début des années soixante. ¹¹⁶ Pour les laboratoires, elle s'achève avec le changement de nom des laboratoires, c'est-à-dire de manière significative sur

¹¹⁴ Sa première publication portant sur un composé solide date de 1959 et n'est que la quinzième de sa carrière [Hagenmuller, 1977].

¹¹⁵ « Chrétien avait lancé, chez Gauthier-Villars, la *Revue de chimie minérale*, reprise par Silber, un de ses élèves qui a peu marqué la science d'un point de vue créativité scientifique. » [I Tournoux, 2005, p. 13].

¹¹⁶ Il est assez piquant que ce soit en *Chrétienté* que se déclare la première catégorie officielle « chimie dans l'état solide » (1963) à un moment où le CECM revendique la « chimie métallurgique » et que Hagenmuller dirige un Laboratoire de chimie minérale.

la décennie 1966-1975 (III.3.2.1). Entre ces deux dates extrêmes, se situe la date de choix (personnel) pour le directeur d'engager tout son laboratoire vers l'état solide. Il est étonnant de sentir le temps écoulé entre le choix personnel et le changement de nom : on peut l'estimer ici à une décennie environ. Cet étonnement est celui de l'anachronisme : on ne sent pas alors – avec la lecture à rebours – tout le poids de l'héritage culturel (transmis par l'éducation), l'attachement très fort à la chimie minérale jusque dans les années soixante, voire soixante-dix.

IV.4.1.2. Le programme de recherche « tous azimuts élémentaires » (1956-1963)

Pour Hagenmuller, l'ambiguïté solide/solution ne dure pas bien longtemps, quelques années à peine. Quand l'assise du laboratoire est suffisante, il se détourne des sujets de sa jeunesse sur les solutions aqueuses et peut faire le choix exclusif de « l'étude des réactions par voie sèche ». La synthèse est alors rudimentaire : mélange de diverses poudres solides dans des tubes scellés puis chauffage au four électrique, jusqu'à quelques centaines de degrés Celsius afin que la réaction opère, avant de laisser refroidir pour récupérer un solide polycristallin. Malgré une approche essentiellement « descriptive », le pari est payant. Au début, suivant les us et coutumes en *Chrétienté*, l'explicitation du mécanisme réactionnel est valorisée au même titre que la nouveauté du composé chimique. Il s'agit de « relier systématiquement structure cristalline et propriétés chimiques et [de] justifier l'une par l'autre » [Hagenmuller, 1960]. L'objectif avoué de Hagenmuller en 1960 rappelle clairement, à quinze ans de distance, les discours de Bénard à la Société chimique de France [1946, 1951], qui appelaient d'ailleurs à poursuivre les efforts dans ce sens. Même si Hagenmuller l'ignore à ce moment-là ou feint de l'ignorer – par la suite, il dira que sa source d'inspiration unique est la physique –, il suit et met en pratique la méthodologie préconisée depuis longtemps par la chimie de l'état solide, alors dominée en France par la *Chaudronnerie* (Chaudron, Bénard, Michel, Collongues). Contrairement à celle-ci et à son condisciple Freundlich, Hagenmuller reste cantonné sur les composés ioniques et ne s'oriente pas vers les composés métalliques. Pour les solides minéraux, l'horizon n'est pas pour autant dégagé car chaque famille s'est octroyé une chasse gardée : oxydes des éléments de transition en *Chaudronnerie* puis en *Chrétienté* ; semi-métalliques, carbures, borures et titanates chez Michel, sulfures métalliques pour Flahaut, terres rares chez Trombe.

À Rennes, le jeune professeur n'a peur de rien. Challenger, sa tactique ne consiste pas en une attaque frontale des empires en place mais procède plutôt d'un contournement stratégique des fortifications en place. Pour ne pas se retrouver en compétition directe avec les autres, il choisit de défricher plusieurs domaines « élémentaires » avec ses premiers étudiants :

1. composés oxygénés : oxydes de titane (André Lecerf et Michel Tournoux), oxydes mixtes manganèse et baryum (Antoine Hardy), zircone (Tournoux) et aluminates (Debray) ;
2. fluorures de bore (Robert de Pape, Roger Naslain) et de silicium ;
3. oxyhalogénures : oxybromures d'aluminium (Le Neindre), oxyiodures d'aluminium (David) et de lithium (Tanguy) ;
4. sulfures d'aluminium (Jean Rouxel) et de bore (Chopin) ;
5. hydrures de bore (Maurice Rault) et de silicium (Michel Pouchard).

Dès le début, Hagenmuller s'efforce de contourner les chasses gardées des barons de la chimie minérale, même s'il n'évite pas les oxydes de transition, domaine central des solides minéraux. Cette stratégie du *tous azimuts élémentaires* permet de balayer rapidement le tableau périodique des éléments pendant que les autres laboratoires approfondissent consciencieusement « leur » type élémentaire. Le laboratoire est rapidement composé d'une dizaine d'équipes orientées vers une famille de solides.¹¹⁷ Stratégie avisée : le décollage du Laboratoire est stupéfiant. Cultivant un charisme amphithéâtral, le jeune professeur séduit les étudiants par un enseignement « moderne » et dynamique, cherche à convaincre les plus brillants¹¹⁸ ; l'intrigant se débrouille si bien pour obtenir des financements qu'après seulement quatre années (1956-1960), dix thèses d'État sont déjà en préparation dans un Laboratoire, dont la notoriété est relayée à l'étranger par un extraordinaire ambassadeur polyglotte.¹¹⁹ Le « patron », en costume sombre, rassemble rapidement autour de lui un groupe dynamique d'une douzaine de garçons, portant blouse blanche et cravate.

¹¹⁷ « Bordeaux était principalement centré sur la synthèse, notamment en température et/ou pression, via une dizaine d'équipes spécialisées sur différentes familles de composés (oxydes, fluorures, etc). » [I Dexpert, 2006, p. 2].

¹¹⁸ « j'ai terminé par chimie générale pour laquelle j'ai eu Paul Hagenmuller comme professeur, il m'avait vraiment impressionné. C'est lui qui m'a contacté en me demandant si je voulais travailler chez lui. Je suis donc rentré dans son laboratoire en 1959, je crois. [...] Hagenmuller, d'une part, enseignait une chimie moderne qui détonnait vraiment par rapport aux cours de ses collègues et d'autre part, c'était un professeur enthousiaste avec un charisme assez extraordinaire [...] Je n'étais pas un étudiant extraordinaire, pas aussi brillant que Michel Pouchard par exemple. » [I Tournoux, 2006, p. 1].

« A Rennes, j'ai rencontré un jeune professeur, très dynamique, très engagé, très moderne, Paul Hagenmuller. Il m'a convaincu de faire une thèse avec lui » [I Pouchard, 2004, p. 1].

¹¹⁹ Dès 1959, Hagenmuller et ses élèves (Rouxel, de Pape, Rault) font trois communications au congrès international de chimie de Munich, où Hagenmuller s'est débrouillé pour représenter l'université de Rennes. « La participation active de plusieurs de mes chercheurs à diverses rencontres nationales et internationales a été un signe de vitalité, en même temps qu'elle nous a donné la preuve de l'intérêt que suscitait nos résultats, plus particulièrement auprès de certains laboratoires étrangers. » [Hagenmuller, 1960]. Hagenmuller parle couramment anglais, allemand, russe et espagnol.



Le patron et ses premiers étudiants de Rennes (en 1960).

de gauche à droite : {haut} Jean Rouxel, Bernard Le Neindre, Michel Pouchard, J. David, Debray, Michel Tournoux, Maurice Rault, Chopin {bas} N’Guyen Van Hai, Roger Naslain, Paul Hagenmuller, Robert de Pape, Antoine Hardy, André Lecerf.

Au delà d’une même impression visuelle de solidarité, le contraste est saisissant avec la photographie de Collongues, entouré de ses six « maîtresses de recherche » (IV.3.1.1) : plus fourni – après seulement trois ans d’existence contre cinq ans pour le groupe Collongues –, le groupe ne comporte aucune fille alors qu’elles sont majoritaires, au moins au départ, chez Collongues. Un tel groupe de recherche – une douzaine de thésards pour un seul professeur – détonne par rapport à ceux des laboratoires de chimie d’aujourd’hui. Il résume en une image toute une époque, celle de la construction de la recherche universitaire française, le peuplement d’un « désert ».¹²⁰

En 1960, pragmatique, Hagenmuller se fait élire au Comité national de la recherche scientifique à la section chimie minérale. L’année suivante, il manœuvre habilement pour se réconcilier avec Chrétien en proposant au mandarin d’être président du jury de thèse de Rouxel sur les « chalcogénures d’aluminium ». La croissance du laboratoire rennais étonne et attire. L’université de Bordeaux cherche un professeur de chimie minérale après le départ de « Mademoiselle Josien » pour Paris, nommée à Paris.¹²¹ Les titulaires des chaires de chimie

¹²⁰ Hagenmuller « est tombé au bon moment, là où il y avait un désert, dans les années 60, où il y avait tout à faire du côté de la création de postes. » [I Lucas, 2005, p. 13].

¹²¹ M.-L. Josien fondera un centre de chimie physique à Vitry-Thiais en 1965 à côté du CECM. Au début des années soixante, l’aller retour Paris, province, Paris est encore opérant au cours d’une carrière (I.2.1).

physique, Adolphe Pacault, et de chimie organique, Raymond Calas, ont repéré ce jeune professeur iconoclaste et brillant. Ils vont convaincre le doyen Brus de lui offrir une situation qu'il ne pourra pas refuser : des moyens supplémentaires, des locaux étendus (1000 m²) alors que ceux de Rennes sont étriés (250 m²), des promesses de postes d'enseignant chercheur pour titulariser ses doctorants. La « dot » bordelaise est prête, l'Alsacien accepte et déménage avec les trois quarts de son équipe – une quinzaine de personnes – et les neuf dixièmes du matériel ! Un tel chambardement est impressionnant : on s'incline déjà. Prigent et le reste de son équipe (Jacques Lucas, P. Caillet, J. David...) gardent les locaux et ramassent les miettes (VII.1.1).

Entre-temps, Hagenmuller a programmé pour les « vacances » d'été un voyage collectif outre-Rhin. Il a affrété un bus pour transporter tous ses étudiants, y embarque la petite troupe et la tournée des grands-ducs germaniques peut commencer dans les plus prestigieux laboratoires d'*Anorganische Chemie* : Münster (Wilhelm Klemm et Harald Schäfer), Karlsruhe (R. Scholder), Philips à Eilendorf (Rabenau), Stuttgart, Heidelberg, Giessen, Marburg, Cologne... [I Hagenmuller, 2004, p. 13]. Durant ce voyage d'études, les ex-Rennais font trois principales observations : une synthèse chimique originale, en particulier avec les oxydes et fluorures « à valence anormale » (que Klemm avait aussi présenté devant la Société en avril 1956 (III.4.2.1)) ; une étude structurale très propre pour des compositions chimiques bien définies ; un recours à la « théorie du champ de ligands » pour interpréter certaines propriétés optiques des solides.¹²²

Arrivé en Aquitaine, Hagenmuller planifie consciencieusement le travail du « Laboratoire de chimie minérale ». Il n'encadre pas lui-même les thésards à la paille – rappelons qu'il est lui-même minéraliste des solutions – suivant l'usage d'une époque qui manque de cadres de recherche, et demande aux étudiants en fin de thèse de former ceux qui débent aux techniques de synthèse. Un tour quotidien du laboratoire lui permet de discuter avec les thésards et de surveiller au plus près l'avancement de leurs travaux. Donnant quasiment tout son temps à « son » Laboratoire, il exige en contrepartie beaucoup des autres. De fortes pressions psychologiques pèsent sur les jeunes épaules de ces garçons motivés ; les colères ne sont pas rares ; l'ambiance est studieuse et amicale : les étudiants deviennent des camarades. Quand il s'agit de publier, le patron relit d'un œil sévère le manuscrit ; ligne à ligne, il corrige les thèses, sans concession pour les bidouilles intellectuelles. Fort bon orateur lui-même, le professeur enseigne l'art de parler en public, de convaincre, de se montrer exigeant envers soi-même comme envers les autres. Sous une autorité sans faille se met en place une forme de solidarité, entre le patron et ses élèves d'une part : lorsqu'ils ont besoin de lui, il ne les lâche pas et les soutient jusqu'au bout,¹²³ entre les générations d'autre part : les étudiants plus âgés, formateurs improvisés, rassemblent peu à peu autour d'eux les plus jeunes selon le hasard et les affinités. La première génération des « Rennais » forme bientôt un corps d'officiers, courroie de transmission entre un patron investi d'un pouvoir sacré et des doctorants respectant pieusement ses commandements. L'état-major s'émancipe peu à peu par le choix des thèmes de recherche, de plus en plus laissé à sa discrétion.

¹²² Contrairement à la France, la chimie du solide allemande paraît alors extrêmement influencée par la chimie de coordination : la valence n'est qu'« anormale » par rapport aux degrés d'oxydation couramment observés pour les complexes tandis que la « théorie du champ de ligands » est directement empruntée à la chimie de coordination.

¹²³ « c'est Hagen qui nous a éduqués scientifiquement, qui nous a appris comment vivre dans le milieu, donné des exigences de rigueur très sévères, qu'on n'a pas toujours pu maintenir au même niveau dans nos laboratoires. Chez Hagenmuller, il n'y avait pas de jours fériés, on travaillait le premier Mai, on travaillait le samedi, c'était une autre époque. Quand il y a eu le premier ordinateur à la fac de Bordeaux, on se relayait nuit et jour pour le faire fonctionner. » [I Tournoux, 2005, p. 8].

IV.4.1.3. Le congrès de Bordeaux de 1964 : fondation d'une discipline ou vitrine d'un laboratoire ?

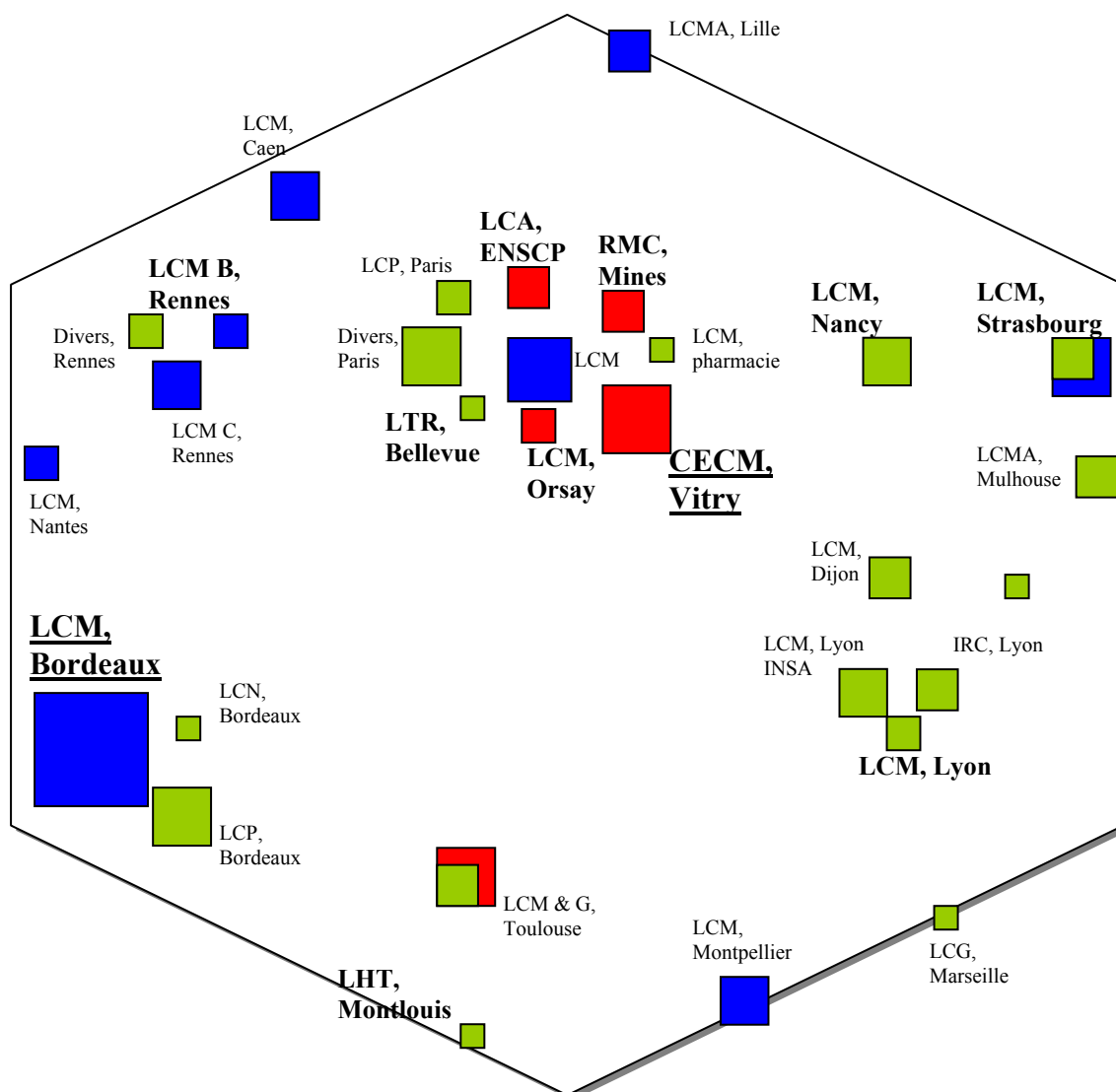
Le professeur poursuit sa stratégie de développement en organisant à Bordeaux, en septembre 1964, un colloque international du CNRS dédié aux « composés oxygénés des éléments de transition à l'état solide » [CNRS, 1965]. Plusieurs témoignages d'anciens de Bordeaux y voient l'un des actes fondateurs de la chimie du solide française, voire internationale. En particulier, deux arguments sont avancés : la présence de nombreux physiciens des solides parmi les chimistes et une large ouverture internationale. Si ce jugement a posteriori, issu de points de vue locaux, tend à exagérer l'importance de la rencontre, il ne faut pas non plus la minimiser. Étape majeure pour l'avenir du groupe bordelais, le colloque structure partiellement une communauté nationale en formation et réunit une large audience internationale. Le compte rendu du colloque, édité au *Bulletin de la Société chimique de France* l'année suivante, constitue une source historiographique qui permet d'esquisser une typologie sommaire.

Le colloque réunit deux cent vingt huit personnes dont une écrasante majorité de Français (181 ; 79%), une vingtaine d'Allemands (20 ; 9%), une quinzaine d'Américains (14 ; 6%), quelques Néerlandais (4), Belges (3), Britanniques (3), Suédois (2) et un Italien. Trente-deux communications sont prononcées. Plus de la moitié des participants sont des chimistes français (120), dont un tiers de *minéralistes* (71). Les autres autochtones sont physiciens universitaires (30), membres du CEA (9), métallurgistes de l'IRSID (5) ou industriels (17). La carte hexagonale fournie ci-dessous établit la répartition géographique et disciplinaire des laboratoires de chimie français, le nombre de membres présents et les communications qu'elles présentent.¹²⁴ Elle visualise une opposition nette entre la *Chaudronnerie*, centrée sur Paris autour du CECM dirigé par Michel à partir de 1962, et la *Chrétienté*, dispersée sur la façade ouest, clairement dominée par le pôle bordelais. Si Hagemmuller organise le colloque avec son premier lieutenant Hardy, Chaudron en est le président honorifique. Au delà de cette polarisation binaire, quatre autres laboratoires se distinguent par leurs communications : les deux laboratoires dirigés par Trombe à Bellevue et Montlouis et les Laboratoires de chimie minérale de Jacques Aubry à Nancy (III.4.2.4) et de René Pâris à Lyon. En rassemblant assez largement une partie des chimistes français étudiant les solides minéraux, le colloque a un rôle structurant évident de la communauté. Deuxième présence nationale à souligner : la quarantaine de physiciens des solides et de métallurgistes qui assistent au congrès à hauteur de leurs communications (19% des participants et des communications) : Félix Bertaut (Grenoble), Jacques Friedel (Orsay), Charles Guillaud (Bellevue), André Herpin (CEA Saclay), Paul Lacombe (Paris), J. Manenc (IRSID). Leur présence contraste avec l'absence des chimistes aux congrès de physique de la même époque.¹²⁵ Enfin, la présence des étrangers est un élément incontournable non seulement par leur présence (21%) mais encore, et peut-

¹²⁴ Chaque laboratoire est repéré par un carré (géographique) et un nom (discipline). L'aire du carré est proportionnelle au nombre de membres présents au congrès, la taille des caractères est 8 si le laboratoire ne communique pas, **10** (gras) pour une communication, **12** (gras, souligné) pour deux. Les carrés de la *Chaudronnerie* sont rouges, ceux de la *Chrétienté* bleus, les autres verts. Abréviations : L (laboratoire), C (chimie), M (minérale), A (appliquée), G (générale), P (physique), N (nucléaire), TR (terres rares), HT (hautes températures), RMC (recherches métallurgiques et chimiques), IRC (institut de recherche sur la catalyse). À Rennes, les deux LCM se distinguent par les lettres B et C.

¹²⁵ À cette époque, les chimistes ne sont pas invités aux colloques internationaux des physiciens comme en juillet 1962 à Orsay sur « *La structure des solutions solides métalliques* » (Guinier, Friedel). En revanche, il existe des réunions officielles en physiciens et chimistes, de moindre ampleur il est vrai, comme les « séminaires de chimie des solides » en 1961-1962 à Saclay (III.4.2.3).

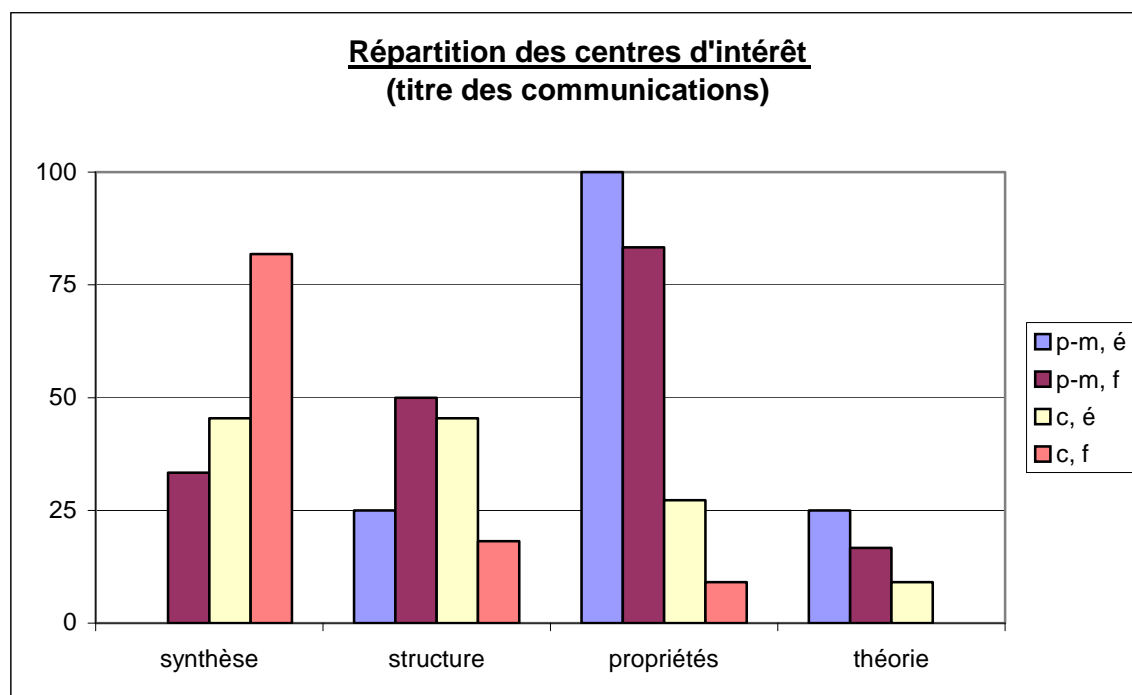
être surtout, par l'importance de leurs contributions, aux niveaux quantitatif (47%) et qualitatif.¹²⁶



Si l'on compare la carte ci-dessus à celle du réseau de chimie de l'état solide à la même époque (III.3.2.4), deux choses sont frappantes. Premièrement, si les principaux laboratoires de chimie de l'état solide ont été invités à Bordeaux, l'étendue du colloque est beaucoup plus vaste puisque les physico-chimistes sont aussi largement représentés. Deuxièmement, de manière visuelle, on s'aperçoit que la *Chrétienté* – en particulier l'école *hagenmullerienne* – est sur-représentée au congrès de Bordeaux par rapport à son importance dans le réseau national de chimie de l'état solide.

¹²⁶ Parmi les orateurs étrangers, on trouve 12 universitaires (quasiment tous chimistes) : J.S. Anderson (Oxford, inorganique), O. Kubaschewski (métallurgie, Teddington), S. Andersson (Stockholm, chimie physique), W. Klemm, R. Hoppe et H. Schäfer (Münster, inorganique), B. Reuter (Berlin, inorganique), O. Schmitz-Du Mont (Bonn, inorganique), R. Scholder (Karlsruhe, inorganique), J. Goodenough (MIT), R. Roy (Pennsylvanie, matériaux), R. Ward (Connecticut, chimie), A. Wold (Providence, engineering) et 3 industriels (essentiellement américains) : G. Blasse (Eindhoven, Philips), F.J. Darnell (Wilmington, Du Pont de Nemours), R.R. Heikes (Pittsburgh, Westinghouse).

Si la cartographie de l'assistance et des orateurs était indispensable pour donner une image de ce paysage choisi, il s'agit désormais de l'utiliser pour repérer qui dit quoi, en particulier comment se situent les chimistes par rapport aux physiciens et les Français par rapport aux étrangers. Je me baserai sur le contenu des titres des communications, en relevant les occurrences de référence à la synthèse, la structure, les propriétés physico-chimiques et la théorie, afin d'évaluer l'ampleur de l'intérêt de chacun des groupes en présence pour ces paramètres.¹²⁷



L'analyse comparative des titres de communications met en évidence des choix d'orientations caractéristiques, qui dessinent un paysage stéréotypé des groupes en présence autour de 1964. Les chimistes français [repérés par « c, f » sur le diagramme] sont essentiellement tournés vers la synthèse de composés nouveaux (80%), l'étude structurale arrivant loin derrière (18%). Une seule communication – « Sur deux groupes de nouveaux composés ferrimagnétiques » – mentionne une propriété magnétique, mais significativement elle est co-signée par trois chimistes bordelais (Lecerf, Rault, Josik Portier) et un physicien de Bellevue, G. Villers, du Laboratoire de magnétisme et de physique du solide (Guillaud). Les chimistes étrangers [c, é] offrent un panel plus large : synthèse certes mais à égalité avec la structure (45%) tandis que les propriétés (27%) sont surtout abordées par les chimistes venus des États-Unis. La répartition des centres d'intérêt des physiciens-métallurgistes [p-m] est inversée par rapport à ceux des chimistes et quasiment semblable entre Français et étrangers : une quasi-totalité des titres indique les propriétés (83% pour les Français contre 100% pour les autres), les Français sont plus orientés vers les études structurales (50 contre 25%) et un

¹²⁷ 50% de structure pour « p-m f » signifie qu'une communication des chimistes français sur deux mentionne l'étude structurale dans son titre. Certes, le titre ne suffit pas à mettre en évidence le contenu des communications mais il est censé résumer ce que l'article cherche à démontrer. D'ailleurs lorsque le titre n'était pas suffisamment explicite, j'ai regardé le contenu des résumés donnés dans le *Bulletin*. Ainsi, l'analyse des titres permet d'obtenir des comparaisons qualitatives et donc de situer les groupes les uns par rapport aux autres. Les différences observées sont d'ailleurs tout à fait significatives.

peu moins vers la théorie que leurs homologues étrangers (17 contre 25%).¹²⁸ La grosse différence réside dans la mention de la synthèse (33% contre 0) mais est en partie due aux pratiques des métallurgistes à mi-chemin entre physique et chimie.

Le colloque, s'il permet aux physiciens et aux chimistes de se rencontrer, n'en révèle pas moins une différence d'approche importante, pouvant parfois aller jusqu'à l'incompréhension entre les deux bouts de la chaîne : synthèse et théorie. Le décalage existe aussi entre la France et l'étranger mais en grande partie du fait d'une forte culture « matériaux » aux États-Unis, même pour les chimistes. Une analyse plus fine montrerait que les Allemands sont sensiblement dans la même optique que les Français, quoiqu'un peu plus tournés vers les analyses structurales. Tout en confirmant aux minéralistes hexagonaux l'existence d'une communauté de chimistes autour des solides, le colloque montre aussi ce qui se fait ailleurs, en particulier l'étude structurale poussée, la focalisation sur l'étude des propriétés physiques et le recours aux théories quantiques.

Hagenmuller sait transformer le congrès de Bordeaux en une vitrine internationale qui le place au cœur des débats sur l'état solide, renforce les quelques contacts qu'il avait déjà ébauchés à l'étranger – les minéralistes allemands bien sûr mais aussi le théoricien américain, John Goodenough – et lui permet de nouer de nouvelles relations avec le cristallographe suédois Sten Andersson, élève de Magnéli (II.4), le thermodynamicien d'origine russe, O. Kubaschewski ou les chimistes américains, Aaron Wold et Rustom Roy. Le congrès marque plus, à mon avis, une première théâtrale (marquante certes) sur la scène internationale que la fondation de la chimie du solide. Plusieurs arguments vont dans ce sens. Le titre du colloque mentionne les oxydes métalliques (et pas chimie du solide par exemple) ; à cette époque-là, la formulation « chimie de l'état solide » est bien plus usitée que « chimie du solide » (quasiment absente) ; pour la seule année 1965, deux autres colloques internationaux organisés en France se réclament de la « physico-chimie du solide » : l'un à Paris sur les « propriétés mécaniques et physico-chimiques des réfractaires » (Chaudron), l'autre à Orsay sur les « propriétés thermodynamiques, physiques et structurales des dérivés semi-métalliques ».

IV.4.1.4. Corpus méthodologique : de la cristallographie aux mesures physiques, l'exemple des bronzes de vanadium (1963-1975)

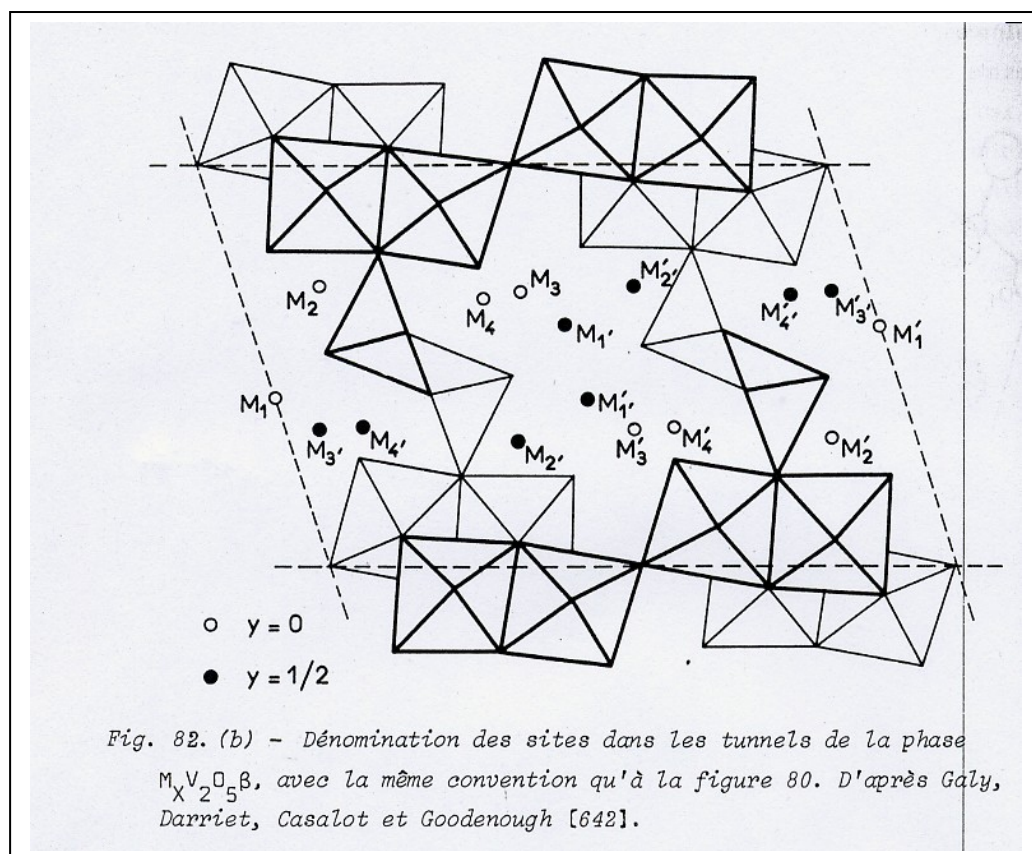
D'Allemagne, les « Bordelais » ont rapporté un souci de l'analyse structurale bien faite, et Goodenough, qui va devenir un intime à Bordeaux, convainc Hagenmuller de se rapprocher de la communauté des physiciens.¹²⁹ Hagenmuller décide qu'il est temps de mettre son Laboratoire de chimie minérale au diapason international. Une famille de composés en particulier va lui permettre de mettre en application de nettes évolutions méthodologiques : les « bronzes de vanadium ». Ceux-ci doivent leur nom aux bronzes de tungstène improprement nommés au XIX^e siècle par Hautefeuille en raison de leurs couleurs chatoyantes entre bleu métallique et rouge cardinal. Au début des années 1960, ces oxydes sont encore mal connus : un Russe, Ozorov, et Wadsley en Australie, ont indépendamment publié la structure cristalline β du $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$ et mis en évidence sa non stœchiométrie [Pouchard, 2005]. La non stœchiométrie des oxydes métalliques est alors un thème crucial en chimie de l'état solide.

¹²⁸ Ceci peut se comprendre dans la mesure où, après-guerre, l'Eldorado des physiciens français déconfits est la physique anglo-saxonne [Pestre, 2004] tandis que les chimistes ont plutôt défendu une approche propre, européenne, voire hexagonale.

¹²⁹ « *Already in the early 1960's, before his building was completed, Hagenmuller came to visit me in Lincoln Laboratory. I strongly advised him to build contacts with the physics community.* » [I Goodenough, 2001, p. 18].

En quelques mois à peine, le patron place au moins quatre étudiants sur le sujet : André Lessaichere d'abord puis Michel Pouchard, Jean Galy et André Casalot, qui développent d'abord l'étude de bronzes de vanadium substitués au lithium du type : $\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$ (avec x réel). C'est d'ailleurs cette famille de composés nouveaux que Pouchard, Galy et Casalot, associés à Hardy, ont présenté au congrès de 1964. En jouant sur les proportions de réactifs, par mélange de poudres de V_2O_5 , VO_2 et Li_2O , les doctorants ont entrepris une étude systématique de $\text{Li}_x\text{V}^{5+}_{2-x}\text{V}^{4+}_x\text{O}_5$ en faisant varier continûment x entre zéro et un. Leur communication orale précise les paramètres de maille et surtout le lien entre la composition chimique et les structures associées, monophasées : (α) « orthorombique » $\{0 < x < 0,13\}$; (β) « monoclinique » $\{0,22 < x < 0,62\}$; (γ) « orthorombique » $\{0,88 < x < 1\}$ ou biphasées ($\alpha + \beta$) $\{0,13 < x < 0,22\}$ et ($\beta + \gamma$) $\{0,62 < x < 0,88\}$. Enfin, elle mentionne les propriétés semi-conductrices des composés $\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$, mesurées à Bellevue, au Laboratoire des hautes pressions de Bellevue. Ainsi, les jeunes gens associent une synthèse originale, systématique, à une analyse structurale de base par diffraction des rayons X sur poudres (type Debye-Scherrer) et, sensibilisés par les physiciens de Bellevue, commencent à évoquer la théorie des bandes.

Par la suite, le projet se construit suivant trois orientations méthodologiques liées les unes aux autres, où chacun doit jouer un rôle propre. Premièrement, Hagenmuller confie à Galy la direction du service de cristallographie et sa modernisation : diffraction sur poudres, manuelle d'abord puis peu à peu automatisée, et diffraction sur « monocristaux » (chambres de Weissenberg et Buerger). Outre sa thèse sur les bronzes de vanadium, Galy s'occupe bientôt des spectres pour les autres équipes. L'analyse structurale prend énormément d'importance : on passe, au Laboratoire, d'environ 2500 spectres annuels vers 1963 à plus de 11000 vers 1966. Cet effort va de pair avec une informatisation progressive (VI.2.2), le premier ordinateur étant acheté en 1964 avec une « mémoire centrale de 8 kilobits ». L'informatique rend possible l'automatisation mais facilite surtout les calculs de transformée de Fourier. Jusque-là, l'interprétation des spectres était faite soit à la main sur un papier, soit au laboratoire de physique d'à-côté sur « l'ordinateur » des physiciens quand ils ne s'en servaient pas, c'est-à-dire la nuit. Quelques thésards bordelais travaillent aussi en étroite collaboration avec le Laboratoire de cristallographie d'Hubert Curien à Paris. Là-bas, Madame Herpin est leur contact privilégié. L'effort de détermination structurale est tel que les bronzes de vanadium de Bordeaux sont mentionnés en 1966 parmi les résultats marquants non seulement de la section « chimie minérale » du CNRS mais encore en « minéralogie et cristallographie » [RA CNRS, 1966, p. 136, 106]. La détermination des structures par diffraction des rayons X devient l'une des forces de la chimie bordelaise. Le schéma ci-dessous montre la structure cristalline d'un dérivé des bronzes de vanadium fabriqué à Bordeaux [Goodenough, 1973, p. 320].



Pour mettre le Laboratoire à l'heure européenne, Galy est envoyé en postdoc en Suède au laboratoire de Magnéli. Là-bas, il travaille avec Sten Andersson qui lui fait découvrir l'analyse structurale fine par la microscopie électronique (VI.2.1.2). À condition de travailler sur monocristal, on peut atteindre une résolution quasiment atomique (10^{-10} m) alors que la diffraction des rayons X résulte d'une interaction moyenne avec des plans atomiques dont la précision se place au-dessus du nanomètre (10^{-9} m). De retour en Aquitaine, Galy cherche à montrer l'importance cruciale du lien entre synthèse et structure – la cristallographie – et monte un groupe de « chimie et cristallographie du solide » au sein du Laboratoire.¹³⁰ La « cristallographie » – expression utilisée aussi par les cristallographes – apparaît au milieu des années soixante au sein de la communauté des chimistes.¹³¹ Il essaie de convaincre Hagemuller d'implanter la technique de microscopie électronique à Bordeaux mais le patron renâcle. Tout au long de sa carrière, l'ancien minéraliste des solutions restera méfiant vis-à-vis de la cristallographie, l'assimilant parfois à un simple travail de routine et dénigrant les savoir-faire propres aux cristallographes¹³². Si le « visionnaire » néglige quelque peu la

¹³⁰ Jacques et Bernard Darriet, Alain Carpy, Jean-Claude Bouloux, Georges Meunier, Jean Senegas travaillent dans le groupe dirigé par Galy, jusqu'en 1975.

¹³¹ À partir de 1966, les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* créent une nouvelle rubrique, la « cristallographie », dans laquelle sont placés certains articles de chimie de l'état solide. D'autre part, sensiblement à la même époque, certains laboratoires de la section minéralogie du CNRS incorporent la « cristallographie » dans leur nom [RA CNRS, 1967].

¹³² Galy et Tournoux émettent (indépendamment) une hypothèse intéressante à ce sujet : le désintérêt, voire la méfiance, de Hagemuller pour la cristallographie et la cristallographie viendrait de sa formation en chimie des solutions, qui le rend peu à l'aise avec la détermination structurale et la vision tridimensionnelle. Hagemuller « n'a pas fait de chimie du solide pendant sa thèse, il n'était pas manipulateur au sens des expériences [...] Ce n'est pas insultant ce que je dis, c'est une constatation. Il a toujours été hésitant en chimie du solide [...] en *cristallo*, il n'avait pas cette vision tridimensionnelle sur les structures. En revanche, il avait très bien développé

cristallographie, décisive au niveau international, c'est qu'il préfère se focaliser sur les propriétés physiques.

À partir de 1965, suivant les conseils de Goodenough, Hagenmuller demande à Casalot et Pouchard de monter un ensemble de caractérisations physiques. Suite à des stages d'apprentissage – à Grenoble chez Bertaut ou en magnéto-chimie chez Pacault –, les deux chimistes mettent en place des mesures électroniques, de pouvoir thermoélectrique (effet Seebeck) et construisent des balances magnétiques plus performantes. On peut alors étudier directement au Laboratoire certains phénomènes physiques sans recourir en permanence aux physiciens.¹³³ Pour les caractérisations trop pointues cependant, ils intensifient les collaborations avec le Laboratoire de physique des solides d'Orsay (Friedel) sur les propriétés de transport (électronique) et le Laboratoire d'électrostatique et de physique du métal à Grenoble (Néel) pour les propriétés magnétiques. Peu à peu, les chimistes apprennent à parler le langage des physiciens et certains s'intéressent de plus en plus à leur débats théoriques. Par exemple, en faisant varier le dopage des bronzes de vanadium en lithium, le matériau présente une « transition métal-isolant », phénomène du plus haut intérêt pour les physiciens des solides. Mott et Goodenough viennent alors souvent à Bordeaux pour confronter leurs modélisations théoriques de la transition aux mesures expérimentales, rendues possibles au Laboratoire par la conjonction d'une synthèse performante et des mesures physiques mises en place.

Ce n'est pas encore suffisant : une troisième innovation méthodologique est nécessaire : la fabrication des monocristaux. La chimie des hautes températures s'y est attelée sous la pression des physiciens et y a bien réussi (voir l'interlude). Les « Bordelais » ont peu ou pas de liens avec la Commission de chimie des hautes températures (V.1) et n'ont pas le savoir-faire que les laboratoires Collongues ou Trombe ont déjà développés. Ils doivent pourtant se jeter dans l'aventure s'ils désirent garder leur indépendance vis-à-vis des autres écoles et continuer d'être courtisés par les physiciens. À partir de la fin des années soixante, un intense programme de recherche de cristallogenèse est lancé pour fabriquer des monocristaux ioniques. Pour combler le retard, Hagenmuller fait jouer ses relations internationales, contacte Wold à *Providence* et Pouchard part six mois aux États-Unis se former sur une technique peu connue en France : le « transport en phase vapeur » (1968).¹³⁴ Ainsi, entre 1966 et 1972, tout un service de cristallogenèse est monté au Laboratoire pour développer non seulement les hautes températures et la synthèse à partir de mélanges en fusion (déjà maîtrisées par les chimistes des hautes températures) mais encore, de manière innovante (par rapport aux solidistes), les hautes pressions, sous la conduite de Rault en collaboration avec Rodot à Bellevue. En 1974, le service s'associe officiellement avec le Laboratoire de physique cristalline de Jean-Pierre Chapelle (Orsay) et celui des hautes pressions (Bellevue) pour former un service propre du CNRS « de diffusion de la technologie des matériaux » (SDTM). À la croisée de trois groupes, le SDTM aura pour objectif de fournir la communauté nationale en matériaux solides – dont des monocristaux – de la meilleure

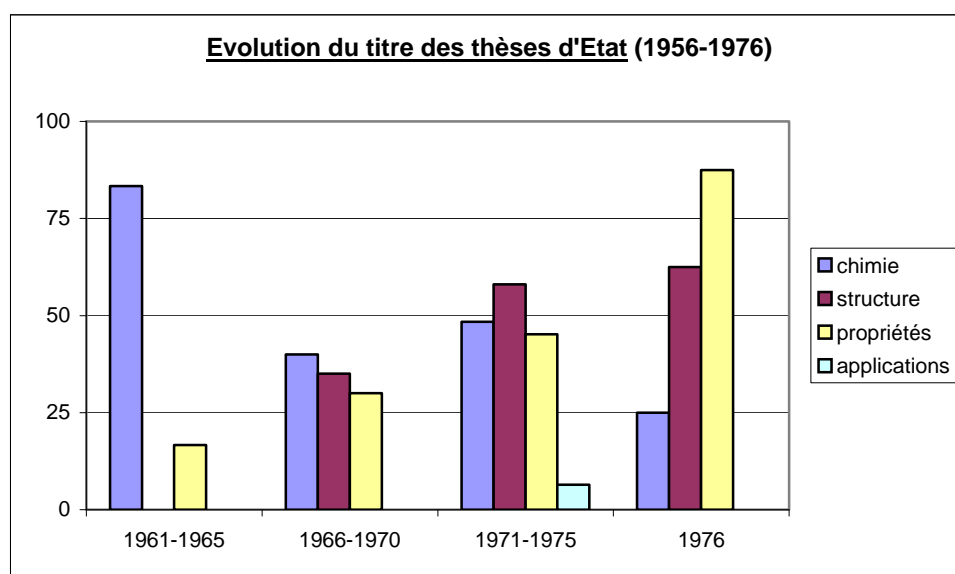
les mesures physiques. » [p. 7-8]. « des gens [...] ont attaqué la cristallographie de façon stupide. Hagenmuller en fait partie » [I Galy, 2006, p. 25-26]. « Mais Hagen lui-même n'a jamais été cristallographe et a toujours eu des relations difficiles avec les cristallographes de son laboratoire qui détenaient un savoir auquel il n'avait pas accès, il les considérait comme des techniciens ! » [I Tournoux, 2006, p. 2-3].

¹³³ « *Already in the early 1960's, before his building was completed, Hagenmuller came to visit me in Lincoln Laboratory. I strongly advised him to build contacts with the physics community has had a little difficulty bringing a physics component into his laboratory, but he did develop techniques for physical measurements and his people have interacted with physicists in Paris and Grenoble.* » [I Goodenough, 2001, p. 18].

¹³⁴ La première mention du transport en phase vapeur que j'ai repérée chez les chimistes français date de (1967-1968) par des membres du Laboratoire des terres rares.

qualité possible. De 1975 à 1984, la direction du service est alternativement assurée par Pouchard, Rodot et Chapelle [Pouchard, 2005].

L'exemple des bronzes de vanadium est intéressant pour au moins trois raisons. Tout d'abord, il correspond à l'un des domaines – les « composés d'insertion » (non stœchiométriques) – pour lequel le Laboratoire bordelais est le plus reconnu au niveau international. Deuxièmement, il montre comment le chimiste, pour garder son autonomie, doit se distinguer par sa capacité à fabriquer de nouveaux composés. Les bronzes de vanadium suggèrent une systématisation des substitutions opérées à partir du bronze substitué au lithium ($\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$) : d'abord on fait varier x de zéro à un, puis le lithium est successivement remplacé par d'autres alcalins, des alcalino-terreux et des métaux de transition (Cu, Zn, Ag, Cd) pour former des composés du type $\text{M}_x\text{V}_2\text{O}_5$ et $\text{M}_y\text{V}_3\text{O}_8$ avec des degrés d'oxydation qui sont respectivement ($\text{V}^{5+}-\text{V}^{4+}$) et ($\text{V}^{4+}-\text{V}^{3+}$). D'autres raffinements conduisent le groupe dirigé par Galy à se pencher sur les bronzes mixtes V/Mo, V/W ou à substituer l'oxygène par le fluor pour fabriquer des bronzes oxyfluorés ($\text{Na}_x\text{V}_2\text{O}_{5-y}\text{F}_y$). Comme quadriller l'espace des possibles est humainement impossible (malgré les énormes moyens du Laboratoire), tout le génie du cristalochimiste réside donc dans le choix, l'induction, la supputation des composés les plus intéressants à fabriquer. Enfin – ce sera la troisième raison – ce cas particulier met en évidence la méthode générale déployée par Hagenmuller et ses élèves au cours des années soixante : maîtrise des hautes températures et hautes pressions pour la synthèse, développement de la diffraction des rayons X associée à l'informatique, mise en place de caractérisations physiques et ouverture vers la théorie des bandes. Moteur du rapprochement avec la physique, le professeur répète à l'envi à ses jeunes collaborateurs : « Faites de la physique, pour pouvoir dialoguer avec les physiciens, faites des cristaux pour pouvoir travailler avec eux » [Pouchard, 2005]. Ces trois évolutions méthodologiques majeures sont transversales, c'est-à-dire qu'on les retrouve (avec de petites variantes) quels que soient les sujets abordés. Une analyse des titres des thèses dirigées par le patron pendant deux décennies (1956-1976) confirme que la tendance observée dans le cas des bronzes de vanadium est générale :



Du début des années soixante et de son approche chimique – la synthèse et la référence aux phases nouvelles sont omniprésentes –, on passe progressivement durant la décennie (1966-1975) à une affirmation des questions structurales et l'émergence des propriétés

physiques. La tendance est pleinement confirmée par l'année 1976 où les proportions (87% propriétés et 62% structure) se trouvent complètement inversées par rapport aux années rennaises, et aux communications du congrès de 1964. Les applications ne percent pas durant ces années en tant qu'objectif affiché : seuls deux énoncés précisent une application industrielle (1971-1975). Les applications potentielles pourtant, sous-jacentes, sont énormes. Au milieu des années 1970, des multinationales comme Exxon retravaillent sur les bronzes de vanadium au lithium pour en faire des matériaux d'électrodes pour batteries rechargeables. En particulier Stanley Whittingham et son équipe y travaillent. Le principe de la batterie envisagée est simple : une cathode métallique au lithium (Li) et une anode d'oxyde de vanadium séparées par un électrolyte liquide. À la décharge (pendant l'utilisation), le lithium s'ionise (Li^+) et migre vers l'anode où il s'intercale dans la matrice d'oxyde de vanadium pour donner $\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$. À la recharge, les cations Li^+ quittent l'anode pour être réduit en métal à la cathode.¹³⁵ C'est le principe des batteries au lithium aujourd'hui largement utilisées (ordinateurs et téléphones portables).

À partir d'un héritage chimique et descriptif – synthèse et mécanismes réactionnels – hérité de la chimie minérale en *Chrétienté*, Hagenmuller a orienté sa méthode vers une conception bien différente, ancrée sur la relation entre la structure et les propriétés physiques des composés solides. Les thèmes de l'époque rennaise ont été poursuivis : oxydes, hydrures, halogénures, puis peu à peu diversifiés vers les oxyfluorures, borures et siliciures, suivant les choix thématiques personnels des « lieutenants ». D'une chimie minérale en solution de facture classique, le Laboratoire est passé à une chimie « moderne », que l'on qualifie de plus en plus de « chimie du solide » à la fin des années soixante.

IV.4.2. L'« âge d'or » du Laboratoire de chimie du solide et ses prétentions disciplinaires (1969-1986)

IV.4.2.1. La puissance institutionnelle au service de l'« école de recherche » hagenmullerienne

Parallèlement à l'évolution épistémologique des années soixante, Hagenmuller travaille aussi à la reconnaissance institutionnelle de son Laboratoire. En 1964, il présente au Comité national le projet pour Bordeaux d'un « Institut de chimie structurale appliquée à l'étude des propriétés du solide » associé au CNRS, qui reçoit un « vote [légèrement]

¹³⁵ « presque dix ans après nos travaux [1975], des Américains ont repris ces idées-là, en essayant de faire des accumulateurs, en particulier Stanley Whittingham, qui travaillait alors à Exxon. Ils se sont dit qu'en mettant du lithium d'un côté, au milieu un électrolyte liquide (un solvant organique avec du perchlorate de lithium dissous) et de l'autre côté un oxyde comme V_2O_5 , ils réaliseraient un nouveau type d'accumulateurs. En effet le lithium est un réducteur très fort, V_2O_5 est un bon oxydant. En décharge, le lithium va s'ioniser pour donner Li^+ qui traverse l'électrolyte liquide pour venir s'intercaler dans le V_2O_5 pendant que les électrons, par le circuit extérieur, vont passer d'une électrode à l'autre pour venir réduire une partie du vanadium V en vanadium IV. C'est le début des batteries au lithium. On peut dire que de ces bronzes de vanadium, sont nées les batteries au lithium, qui ont été affinées bien sûr, ensuite (l'oxyde de vanadium est souvent remplacé par l'oxyde lamellaire de cobalt – découvert aussi à Bordeaux dans le groupe de Claude Delmas) pour atteindre des tensions beaucoup plus élevées. On appelle ces batteries « *rocking-chair* », puisque, à la décharge, le lithium vient s'intercaler, et à la charge, il ressort et redonne du lithium métallique. » [I Pouchard, 2004, p. 16].

favorable » [RC CNRS, 1964, p. 73-75].¹³⁶ La demande d'association au CNRS aboutit deux ans plus tard, lors de la première vague des laboratoires associés (1966), à la création du « Laboratoire de chimie minérale et structurale », dont la nouvelle dénomination insiste essentiellement sur l'aspect structural. Être associé au CNRS résonne autant comme un label qualité que comme la promesse d'espèces sonnantes à venir. En 1969, Hagenmuller présente un nouveau projet visant à devenir laboratoire propre de « chimie du solide ». Ce projet, qui comporte la construction d'un nouveau bâtiment (5500m², 7 millions de francs) et des équipements supplémentaires (2,3 millions), devrait atteindre la somme rondelette de dix millions de francs (soit autant d'euros de 2006) [RC CNRS, 1969, p. 20-21]. Finalement, le CNRS ayant décidé de geler ses constructions à partir de 1974, le nouveau bâtiment ne verra pas le jour et d'anciens locaux seront simplement rénovés pour augmenter la superficie disponible. Devenu entité propre du CNRS, le laboratoire est renommé en « Laboratoire de chimie du solide ». En une vingtaine d'années (1961-1982), l'effectif du Laboratoire a été multiplié par neuf passant d'une douzaine de membres à cent quinze. Ce qui correspond à cinq nouveaux postes par an ! Pour comprendre une croissance aussi exceptionnelle – trois fois plus importante que celle du CNRS, qui connaît alors un « âge d'or » –,¹³⁷ la conjonction de divers facteurs est nécessaire : de bons résultats scientifiques certes mais aussi des engagements pris par l'université bordelaise lors du déménagement (1961), une politique du CNRS favorable à ses unités propres et dernier facteur mais non le moindre : l'exceptionnelle personnalité d'un homme rude en affaire, manipulateur et implacable en commissions. Hagenmuller siègera quai Anatole France, au Comité national du CNRS, sans interruption de 1960 à 1986 – en étant deux fois présidents de section –, et au Comité consultatif des universités à partir de 1970. Il y fait la pluie et le beau temps, personne ne s'opposant frontalement à lui, dans la section ou même parmi les physiciens de sa génération.¹³⁸

Si Hagenmuller impose son Laboratoire à l'extérieur, il sait aussi attirer les meilleurs conférenciers à Bordeaux pour sensibiliser ses thésards aux travaux des écoles rivales.¹³⁹ Goodenough fait plusieurs séjours à Bordeaux. À la fin des années soixante, il y est invité pour trois mois, ce qui donne l'occasion à André Casalot de traduire son ouvrage de référence en chimie du solide : *Les oxydes des métaux de transition* [Goodenough, 1973].¹⁴⁰

Mais c'est surtout par une organisation impeccable des groupes de recherche que le laboratoire bordelais impressionne. À mesure que le Laboratoire croît, on glisse de l'agrégation informelle des nouveaux thésards autour d'« anciens » qui ont su développer des

¹³⁶ L'adhésion au projet est loin d'être unanime : un premier vote a donné 9 pour, 9 contre et 2 abstentions, ce qui conduit à un deuxième scrutin, emporté de justesse : 10 pour, 8 contre et 1 abstention [RC CNRS, 1964, résumé des propositions, p. 20].

¹³⁷ Pour comparaison, la période (1959-1982) correspond à la plus forte croissance des effectifs du CNRS, durant laquelle ils sont multipliés par trois passant de 7669 à 23009 [Picard, 1990, p. 214]. Malgré cette progression vertigineuse du Laboratoire bordelais, un sentiment de frustration surnage. Ainsi, le rapport d'activité de 1982 précise : « mais sur le plan de la science c'est moins le mérite qui compte que le résultat et on ne peut que regretter que la communauté scientifique dont nous dépendons, qu'elles qu'aient pu être ses circonstances atténuantes à des moments de pénurie, ait parfois cédé à la tentation du saupoudrage » [RA LCS, 1982].

¹³⁸ « Dès qu'on était contre Hagenmuller, d'abord il était surpris et ensuite il considérait cela comme un crime de lèse-majesté. Je n'ai vu personne en France qui a tenté de le limiter, de s'opposer frontalement à lui : c'était le « phénomène Hagen » ! Même les physiciens n'osaient pas le contrer. Je regrette vraiment que, parmi tous les professeurs de sa génération, aucun ne faisait vraiment le poids face à une telle personnalité. La génération suivante, la mienne, n'a pas non plus suffisamment rectifié le tir. » [I Galy, 2006, p. 17].

¹³⁹ « Après le congrès de 1964, il organisa de nombreux séminaires, à Bordeaux, où il invitait des personnalités françaises : Collongues, Flahaut, Bertaut, Curien, ou étrangères... » [I Tournoux, 2006, p. 8].

¹⁴⁰ « In the late 1960s I was able to accept an invitation from him to spend three months in his laboratory; it was on that occasion that André Casalot translated my *Metallic Oxides* into the French book *Les oxydes des métaux de transition*. » [I Goodenough, 2001, p. 18].

thèmes propres, vers une organisation institutionnalisée, articulée en « groupes ». Les étudiants de la première génération [rennaise] et de la deuxième [bordelaise], « lieutenants » informels, sont devenus des chefs de groupe, qui dirigent ou orientent les générations suivantes. Vers 1975, le Laboratoire, qui rassemble quatre-vingt-dix membres, est organisé de la façon suivante [RA LCS, 1975, p. 56-60]. Un service technique d'une quinzaine de personnes assure une intervention transversale de manière à satisfaire les besoins communs : cristallographie, programmation, élaboration d'appareils, cryogénie (basse température pour les mesures), atelier, secrétariat... Les agrégats thématiques sont devenus des « groupes » – une douzaine – de manière à optimiser l'amplitude des recherches couvertes et leur complémentarité. Chaque groupe correspond à une dénomination suivant l'un des trois critères suivants :

- un **élément chimique** : le « fluor » (Portier, 19 personnes), le « bore » et ses alliages (Naslain, 9), les « nitrures » et « oxy-nitrures » (Jean Étourneau, 5), les « oxydes » (Le Flem, 10), l'« hydrogène » (Michel Devalette, 5) ;
- une **propriété physique** : « ferroélectricité » (Jean Ravez, 6), « conductivité ionique » (Jean-Maurice Reau, 4), « conduction » et « transitions isolant-métal » (Villeneuve, 5), « mesures magnétiques » (Pouchard, 13), « optiques » (Claude Fouassier, 5), « thermodynamique » (Marc Onillon, 3) ;
- une **technique** : « hautes pressions » (Hagenmuller, 4), « hautes températures » (Le Flem).

La structuration est à mi-chemin entre une logique « élémentaire » basée sur le tableau périodique (du chimiste) et une logique « instrumentale » (caractérisation physique et synthèse chimique).

L'organisation reste souple cependant et nombre de chercheurs travaillent à cheval sur plusieurs groupes suivant les thèmes ou les « affinités électives ». Le patron rencontre alternativement chacune des équipes et réunit de temps en temps l'état-major, pour régler un problème, décider de grandes orientations ou pour communiquer des informations intéressantes, récoltées à l'extérieur.¹⁴¹ Au niveau hiérarchique, Hagenmuller dirige « son » Laboratoire d'une main de fer, avec autorité, de l'état-major à la base de l'édifice. Pour le convaincre, il vaut mieux agir en douceur, avec doigté. Les attaques frontales se soldent par des échecs. Certains lieutenants – Galy en particulier – ne supportent pas l'autorité trop rigoureuse du chef et le lui font savoir – surtout après son retour de postdoc –. Les Conseils de laboratoire deviennent houleux, les affrontements de plus en plus lourds.¹⁴² Galy et Casalot, son ami, quittent le Laboratoire en 1975. L'année 1974-1975 marque un recul des questions structurales : le nom du Laboratoire abandonne la référence explicite à la structure (1974) ; le groupe de « cristalochimie » est dissous après le départ de Galy (1975) et ses collaborateurs sont dispatchés dans les différents groupes. Hagenmuller considère que l'analyse structurale est devenue une pratique routinière, qui ne nécessite pas un effort particulier. Le groupe

¹⁴¹ « Le laboratoire était organisé en équipes et il y avait des réunions de travail soit au sein d'un groupe avec lui [Hagenmuller], et il voyait régulièrement tous les groupes, soit même avec plusieurs groupes ensemble. Lorsqu'il y avait un problème important et qu'il avait connaissance de choses intéressantes qui se passaient à l'étranger, il réunissait l'état-major de son laboratoire pour raconter ce qu'il avait vu, les conversations qu'il avait eues, les perspectives possibles. Ensuite, chacun définissait ses projets en fonction de la réunion. » [I Pouchard, 2004, p. 23].

¹⁴² « Avec moi, [Hagenmuller] a toujours été parfaitement correct, dans l'expression, ce qu'il n'a pas été avec ses élèves, dans son labo. [...] Évidemment, quand un jeune chercheur, encore chargé de recherches, se permettait de lui dire qu'il n'était pas d'accord et que ça restait dur, ça n'allait plus. [...] Comme je ne voulais pas mener la guerre avec lui, vous savez : ça *avoinait* dur dans les conseils de laboratoire, c'était chaud ! (rire) Je voulais faire de la science et je suis venu à Toulouse, en 75. » [I Galy, 2006, p. 6-8]

Naslain cependant s'appelle encore « cristallographie du bore et des borures ».¹⁴³ Les lieutenants sont assez libres cependant de diriger leur groupe, mis à part quelques recommandations générales.

Jusqu'aux années soixante-dix, le recrutement des thésards et des permanents est plutôt local, soit à l'université, soit à l'École de chimie, ce qui favorise un apprentissage endogène des savoirs et savoir-faire. Que ce soit en amphithéâtre – Hagenmuller au début puis les premiers enseignants chercheurs – ou à la paillasse – par les différents médiateurs détenteurs du savoir (anciens et techniciens) –, la formation reproduit les idées-force du patron et homogénéise le cénacle bordelais, qui peut être défini comme une « école de recherche » au sens de Geison [1981] jusque dans les années quatre-vingt. En effet, malgré les changements successifs qui affectent le Laboratoire (noms, lieux, institutions), une identité collective forte se construit entre ceux qui s'appellent désormais « les Bordelais » et les autres écoles : celle de Collongues surtout, mais aussi à Rennes, Lyon, Bellevue... À l'Autre, on oppose un moi homogène, endogène, filial, on se groupe en une famille qui se réclame de méthodes différentes des autres clans.

L'école de recherche *hagenmullerienne* s'oriente d'abord vers une chimie minérale structurale puis passe aux caractérisations physiques en délaissant, trop rapidement selon certains, la cristallographie, fond de commerce du chimiste. Au milieu des années 1970, Hagenmuller définit sa méthode comme l'étude cognitive des relations entre composition-structure et propriétés physiques ou mécaniques des solides, grâce à la liaison chimique, outil préférentiel du chimiste. L'originalité qu'il revendique porte sur le caractère prédictif de ses travaux qui permet, cherchant une propriété physique, de déduire une composition-structure convenable. Elle consisterait donc en une inversion de la polarité revendiquée par Collongues [1979] par exemple : de structure→propriétés vers propriété→structures. La synthèse systématique qui a longtemps caractérisé le travail des « Bordelais » est-il alors modifié par l'avènement d'une hypothétique prédiction ? Quoiqu'il en soit, la recherche fondamentale se double en permanence d'une volonté de répondre aux demandes de la société en applications industrielles à partir de propriétés physiques intéressantes.

IV.4.2.2. Une science dépendante de la société et ouverte sur le monde

Hagenmuller n'est pas idéologiquement opposé aux applications de la science à l'économie. Durant les années soixante pourtant, peu d'efforts sont engagés vers les industriels. Durant, les Trente Glorieuses, l'État providence suffit à abonder les laboratoires publics en moyens impressionnants, via le CNRS et le ministère de l'Éducation nationale. Certes, Bordeaux collabore sur des sujets « fondamentaux » avec des chercheurs américains, qui sont eux-mêmes souvent financés par l'*U.S. Army* : Goodenough ou Wold, ou par des firmes privées : John Kasper, cristallographe de la *General Electric*, participe à l'élucidation de la structure de « clathrates de silicium » (M_8Si_{46}) découverts à Bordeaux (1965). Mais mis à part quelques cas ponctuels, les recherches appliquées ne sont pas prioritaires.

Au début des années soixante-dix, les choses changent. Tout d'abord, le Laboratoire commence à participer aux actions concertées du CNRS. Hagenmuller dirige l'une des dernières RCP (1970-1973), qui porte sur les « propriétés physiques des composés fluorés ». À partir de 1971, les « Bordelais » participent à diverses ATP : « matériaux » (1972),

¹⁴³ Naslain est d'ailleurs celui des élèves de Hagenmuller qui est distingué par Galy : « Parmi [les élèves de Hagenmuller], j'en distinguerai un : Roger Naslain, qui a créé le Laboratoire des composites thermostrostructuraux à Bordeaux et qui faisait une très belle chimie au labo, l'un des plus brillants chercheurs d'Hagenmuller. » [I Galy, 2006, p. 7].

« énergie » (1974), « relations structures-propriétés physiques » (1975). Outre l'apport financier important, ces projets à vocation multidisciplinaire permettent de poursuivre et d'amplifier les collaborations avec physiciens, cristallographes ou métallurgistes qui avaient été développées de manière personnelle au cours des années soixante. Un changement qualitatif s'opère lorsque le Laboratoire commence à intervenir sur les Actions concertées (AC) de la DGRST. En effet, plus tournées vers les applications que les actions du CNRS, les AC associent universitaires et industriels autour d'une question économique prioritaire. Le Laboratoire bordelais s'intègre à plusieurs AC : « composés non métalliques » (1969), « physique électronique » (1974), « hydrogène » (1976). Au moment du choc pétrolier (1973), puis de la crise économique subséquente, le Laboratoire s'engage de plus en plus résolument dans la résolution de problèmes énergétiques : « stockage d'énergie chimique sous forme d'hydrogène ou d'hydrures réversibles », « stockage électrochimique », « conversion de l'énergie solaire » [Hagemuller, 1977, p. 6]. Les solides minéraux jouent aussi un rôle dans la réalisation de piles à combustible nécessitant un « électrolyte solide ionique ». Trois groupes, fluor, conductivité ionique et hydrogène, tirent leur épingle du jeu grâce aux incitations industrielles du CNRS et de la DGRST certes mais aussi à Gaz de France et à la Compagnie générale d'électricité (CGE) – future Alcatel –. Car, ils travaillent à la fabrication de matériaux ciblés, qui pourront éventuellement être utilisés : un hydrure de magnésium (stockage chimique) et un fluorure double de plomb et de bismuth ($PbSnF_4$, meilleur conducteur anionique connu) assurent alors la renommée industrielle de Hagemuller, bientôt connu comme le « monsieur hydrogène » français.¹⁴⁴ De manière concomitante aux baisses de financements non contractuels au début des années 1970 se développe un discours sur la responsabilité des scientifiques « vis-à-vis de la société », responsabilité qui se traduit au début sur les seules questions économiques. Malgré quelques annonces, le souci écologique par exemple ne constitue pas une priorité à ce moment-là [Hagemuller, 1977]. Alors qu'elle est sous-tendue par une baisse des crédits récurrents, la collaboration industrielle est rapidement présentée comme un moyen d'enrichir les travaux universitaires par de nouvelles thématiques.

Outre l'énergie, le Laboratoire multiplie les contrats avec les entreprises industrielles, qu'elles soient chimiques : Elf-Atochem, Saint-Gobain, Rhône-Poulenc ou BASF (oxydes de chrome), pharmaceutique : Aventis, métallurgique : Pechiney, militaire : Direction des recherches et des moyens d'essais (DRME) sur les propriétés optiques et magnétiques, ou électronique : Thomson, Thalès, IBM, CNET (Centre national d'études en télécommunications). Jean-Claude Launay collabore avec le CNES (Centre national d'études spatiales) et son département d'« Élaboration des matériaux dans l'espace » sur des questions de cristallogenèse des oxydes de vanadium (IV.4.1.4) en apesanteur. Des collaborations sont établies les États-Unis et l'URSS. Le coût de mise en orbite est tellement élevé que ce type de croissance en apesanteur n'est pas rentable.¹⁴⁵ À partir de 1982, le Laboratoire participe

¹⁴⁴ Très concrètement, en 1975, parmi les quatorze chercheurs (hors thésards) du groupe du fluor, trois sont directement payés par la DGRST. Deux d'entre eux travaillent aussi dans le groupe « conductivité ionique » [RA LCS, 1975, p. 56-57]. La force motrice de l'« utilité » est encore plus sensible pour le financement des thésards, plus sensible aux effets de mode.

¹⁴⁵ « sous l'égide du CNES cette fois-ci et de son groupe, Elaboration des Matériaux dans l'Espace, un projet similaire [de cristallogenèse] a été accepté. Nous avons constitué au CNES un Comité *ad hoc* (présidé par Authier) qui a pu sélectionner un certain nombre de programmes, dont le nôtre. Nous avons ainsi réalisé des manipulations de cristallogenèse dans l'espace avec les Américains et avec les Russes. Avec les Russes, ce n'était pas toujours très facile parce que l'organisation des expériences manquait parfois de rigueur technique. Néanmoins il y a eu des résultats tout à fait intéressants de cristallogenèse de semi-conducteurs. Ce fut aussi l'occasion d'apprendre encore une autre physique, la mécanique des fluides, car les mouvements de convection sont régis par ses lois. Ce thème devenait trop mathématique, j'ai laissé Launay développer seul ce genre d'expériences, il a continué jusqu'à très récemment. – PT : Est-ce que ça a donné de meilleurs résultats ? – MP : Oui, bien sûr, mais il est difficile d'être péremptoire. On prépare toujours avec un soin exceptionnel une expérience unique qui coûte particulièrement cher. Je crois qu'on ne peut faire de la croissance de matériaux

activement au Programme interdisciplinaire de recherche sur les matériaux (PIRMAT) mettant en relation étroite universitaires et industriels (VI.3.3.2). Depuis 1975, Naslain et son équipe nouent des liens de plus en plus forts avec la Société européenne de propulsion (SEP), filiale de la Snecma, autour de matériaux composites à base de borures. Cette collaboration se solde, en 1988, par la création, à deux pas du Laboratoire de chimie du solide, du Laboratoire des composites thermostructuraux, unité mixte associant le CNRS, l'université et la SEP, sous la direction de Naslain.

Principale conséquence du rapprochement avec les applications : la visibilité des « Bordelais » par les industriels croît ainsi que la fréquentation des thésards dans les centres R&D. Or, la fin des années soixante-dix est marquée par une baisse des recrutements à l'université et au CNRS, ce qui permet de réorienter les jeunes docteurs vers l'industrie. Et justement, le Laboratoire a pu être qualifié d'« usine à thèses » : en vingt-cinq ans (1961-1986), trois cents thèses environ y ont été soutenues, volume bien trop important pour être absorbé par le seul système universitaire. Un calcul d'ordre de grandeur¹⁴⁶ suggère qu'un cinquième des doctorants bordelais sont recrutés à Bordeaux et que 60% rejoignent l'industrie, soit environ cent quatre-vingts docteurs sur la période 1960-1985. Au contact des industriels durant un stage ou une thèse, les thésards, qu'ils soient ingénieurs ou universitaires, peuvent être recrutés plus facilement.¹⁴⁷ Réciproquement, en plaçant ses thésards dans l'industrie, le Laboratoire multiplie les interlocuteurs possibles pour l'avenir.¹⁴⁸ Chacun des deux partis tire des profits de l'association. Hagenmuller est partie prenante de cette ouverture vers les applications industrielles : co-auteur d'une quarantaine de brevets au cours de sa carrière, consultant scientifique auprès de l'Agence nationale de valorisation de la recherche du CNRS (ANVAR) en 1973, membre du *Science advising committee* d'IBM aux États-Unis comme seul membre étranger en 1984.

Cette position stratégique chez IBM reflète la plus grande force du patron bordelais : son ouverture internationale et la reconnaissance mondiale qui en a découlé. Marqué par ses expériences de jeunesse – déporté puis exilé –, doué pour l'apprentissage des langues, à l'aise à l'oral, Hagenmuller est intimement convaincu de la dimension internationale, quasiment universelle, de la science. Il n'a de cesse durant sa carrière de se faire connaître et de montrer son Laboratoire au monde entier : congrès international de Bordeaux (1964), participation au comité de rédaction de revues internationales (à partir de 1966), communications orales (congrès et dans les laboratoires). Les innombrables collaborations internationales qu'il

dans l'espace que s'il y a une valeur ajoutée exceptionnelle car le coût de telles expériences est exorbitant. Pourtant, pour des expériences fondamentales, des fours à image de petite dimension ont été envoyés dans l'espace pour faire des expériences de fusion de zone et vérifier que les courants de convection n'existaient pas et que la croissance résultait de la diffusion pure. » [I Pouchard, 2004, p. 13]

¹⁴⁶ Si on considère globalement la période 1960-1985, le LCS a en moyenne douze doctorants et cinq recrutements (dont la moitié de chercheur) par an, ce qui donne un cinquième des doctorants bordelais recruté à Bordeaux. Si on estime à un autre cinquième le nombre de docteurs bordelais recrutés par l'Université en France et à l'étranger, il reste 60% de doctorants recrutés par l'industrie, soit cent quatre-vingts environ.

¹⁴⁷ L'exemple de Patrick Maestro rend bien compte d'un tel processus. Universitaire bordelais, Maestro rejoint le groupe des hautes pressions fin 1975, pour une thèse de 3^e cycle sur un sujet fondamental : le « développement de l'anisotropie magnéto-cristalline de l'oxyde de chrome ferromagnétique » (CrO₂), financée par une bourse publique. Son objectif est d'entrer au CNRS. Au cours de sa thèse, Hagenmuller lui propose pour l'été un stage au centre R&D d'Aubervilliers, chez Rhône-Poulenc, qui s'intéresse alors aux matériaux pour l'enregistrement magnétique. Le courant passe et Rhône-Poulenc décide de financer la thèse d'État du jeune universitaire. Avant même la fin de sa thèse, à une époque où le recrutement est bloqué au CNRS, il est embauché chez Rhône-Poulenc où il va mener une belle carrière.

¹⁴⁸ À partir de 1986, le groupe des « matériaux oxygénés à valence mixte », dirigé par Pouchard, connaît des difficultés financières et de recrutement. Pouchard, consultant chez Rhône-Poulenc, décide alors de monter un partenariat avec le centre R&D d'Aubervilliers et d'y créer un groupe de recherche. Il y retrouve... Maestro, avec qui il a travaillé lorsque ce dernier était thésard à Bordeaux. La boucle est bouclée !

encourage sont marquées par une vision gaullienne du monde : attaché à l'Europe des nations, pragmatique dans la guerre froide, concerné par le « tiers-monde ». Très tôt, il œuvre à une réconciliation avec le peuple allemand (voyage de 1960) puis co-organise avec Klemm en 1978 le premier congrès européen de chimie du solide, à Strasbourg, au Laboratoire dirigé par Bernier, ancien élève de Michel (VIII.2.1.3). Alors qu'à l'été 1965, il rend visite à Goodenough au *Lincoln Laboratory*, financé – entre-autre – par la département de la Défense états-unienne, il commence à collaborer avec les pays du Pacte de Varsovie dès 1968. Il est bientôt traité comme les hauts dignitaires du régime soviétique.¹⁴⁹ Influencé par l'héritage colonial de la France, il pense la métropole dans un rôle de « civilisation » et de rayonnement francophone. Il voyage sans compter : Maroc, Algérie, Tunisie, Israël, Togo, Cameroun, Brésil, Argentine, Chili, Inde, Sri Lanka, Chine, Malaisie, Viêt-Nam, Corée du Sud... Thésards et postdoc affluent, souvent d'ailleurs avec un financement de leur pays d'origine. En 1997, il est aussi élu membre associé de l'Académie des sciences du tiers-monde. Les postdoc japonais sont légions en Aquitaine, à tel point qu'une association « Japon-Bordeaux, chimie du solide » a été créée par les anciens élèves de Bordeaux – une quarantaine – qu'Hagenmuller co-préside avec le professeur Yamamoto (Nagoya).

Le Laboratoire bordelais est « le » laboratoire de chimie du solide qu'il faut avoir vu au cours des années 1970, 1980 : « officiels » et scientifiques du monde entier viennent le visiter. Tout y est organisé dans un souci d'ordre, d'efficacité et de pragmatisme.¹⁵⁰ À partir des années soixante-dix, Hagenmuller correspond tout à fait à l'image du « scientifique administrateur », dont Jacq et Pestre [1996] situent l'apparition en après 1960. Hagenmuller connaît néanmoins des déconvenues : Goodenough, à qui il proposait un poste à Bordeaux, décline son offre et préfère prendre la chaire de chimie inorganique d'Oxford en 1975.¹⁵¹ Le résultat des échanges internationaux tous azimuts est d'autant plus incroyable que le premier article rédigé en anglais date seulement de décembre 1965 (sur les clathrates avec Kasper dans *Science*) et que ce n'est pas avant 1976 qu'une part significative des publications (au-dessus de 10%) est écrite en anglais. N'est-ce pas un indice de la force d'une chimie du solide bordelaise, et plus généralement française, qu'elle est suffisamment attrayante pour être lue en français ? Entre 1970 et 1975, Hagenmuller est reconnu par les trois académies des sciences allemandes (Göttingen, Léopoldina, RDA) puis par la soviétique confirmant ainsi l'adage suivant lequel il est difficile d'être prophète en son pays (il ne sera élu que « correspondant » en France et en 1978 seulement). Les années quatre-vingt marquent une apothéose internationale tant dans les salons académiques de nombreux pays ou leurs universités prestigieuses que dans les rues de Bangalore où il est l'« ami » des chauffeurs de taxi.¹⁵²

¹⁴⁹ Hagenmuller était « très fort pour les liens avec l'étranger. Il nous avait raconté une anecdote : au cours d'un de ses voyages en Russie, il avait été hospitalisé et on lui avait réservé à l'hôpital, la chambre pour les grands dignitaires du régime. » [I Flahaut & Rivet, 2006, p. 6].

¹⁵⁰ Pour exemple, entre janvier 1978 et décembre 1981, 18 « chercheurs français » et 92 « chercheurs étrangers » font un stage long au Laboratoire (entre un mois et un an) [RA LCS, 1982, p. 89-96]. « Son laboratoire, c'était le laboratoire qu'on allait visiter, les ministres et les autres. De l'extérieur, c'était très bien organisé, impeccable et impressionnant. [...] Du point de vue de l'organisation, c'était évident et parfait. [...] on l'encensait sur le côté organisationnel, c'était parfait mais ce n'était pas un mec très intéressé par la science elle-même. Il n'allait pas toucher les monocristaux en prenant plaisir. *PT* : *Ce n'était pas un chimiste ?* – [...] c'est un manager, un politique, il aurait pu être directeur de boîte. Il a une énorme classe mais ce n'est pas ce que j'appelle un scientifique » [I Lucas, 2005, p. 6].

¹⁵¹ « *in 1976, Hagenmuller offered me a post in Bordeaux that I declined in favor of the position at Oxford. I received a Docteur honoris causa from the University of Bordeaux in 1967* » [I Goodenough, 2001, p. 18].

¹⁵² « Raveau est aussi à la source de la meilleure anecdote sur Hagenmuller : lorsqu'il a pris un taxi à Bombay [c'est Bangalore en fait], le chauffeur, reconnaissant son accent, lui a dit : "si vous êtes Français, vous devez connaître mon ami Hagenmuller". » [I Tournoux, 2006, p. 15].

IV.4.2.3. Stratégie hexagonale : essaimer ses élèves et façonner une discipline

S'il a des amis, Hagenmuller s'est aussi fait de nombreux ennemis. Le refus récurrent qui lui interdit l'entrée de l'Institut de France comme membre de l'Académie des sciences en révèle au moins un, ferme et décidé.¹⁵³ C'est que l'on ne construit pas un tel empire social sans provoquer des inimitiés. Contrairement à l'international, sa stratégie n'est pas ici éditoriale. En effet, il faut attendre 1988 pour que, pressé par la demande anxieuse de son vieux maître, il accepte, du bout des lèvres, de reprendre la *Revue de chimie minérale* menacée de disparition, en tant que président du comité de rédaction. Si celle-ci a commencé par se disperser entre état solide et solutions, elle s'est recentrée au cours des années 1970 sur la « chimie du solide ». Pourtant, le nombre de ses abonnements et son « facteur d'impact » sont en chute libre malgré une aide croissante du CNRS.¹⁵⁴ À l'occasion de la reprise, Hagenmuller la transforme en un *European journal of solid state and inorganic chemistry*, impose la langue anglaise et forme au comité de rédaction un triumvirat européen éclectique : Tournoux pour la chimie du solide française ; Roesky, un Allemand travaillant en chimie de coordination (Göttingen) ; Kaldis, minéraliste installé à l'Institut polytechnique de Zürich (VIII.2.1.3).¹⁵⁵ À partir d'une revue francophone, hexagonale, basée sur une division traditionnelle de la chimie, Hagenmuller fabrique une revue de facture internationale : en langue anglaise, européenne et ouverte aux composantes les plus dynamiques de l'ancienne chimie minérale, chimie de coordination et du solide. Sa vision éditoriale rejoint donc l'idée internationaliste de la science qui lui tient à cœur.

Pour se développer au niveau national, il choisit une toute autre voie. Tout en oeuvrant dans les antichambres des institutions à Paris ou à Bordeaux, Hagenmuller encourage sur le terrain un peuplement large de ses héritiers sur le territoire national en évitant la région parisienne, déjà surpeuplée. Ainsi, il « place » avec soin ses anciens doctorants dans les

¹⁵³ La non élection du patron comme membre permanent pose un point d'interrogation dans la mesure où deux de ses premiers étudiants – Rouxel (1988) et Pouchard (1992) – sont entrés à l'Académie des sciences. Il comptait probablement être élu membre en 1988 – il rédige une *Notice* à cette date – lorsque Rouxel y est élu. Or, le veto d'un seul membre suffit pour interdire l'accès du quai Conti : il s'agirait de Fernand Gallais avec lequel le fougueux Hagenmuller se serait disputé (il l'aurait traité de "con solennel"), et qui semble prendre un malin plaisir à rédiger la notice d'Hagenmuller en 1978 qu'il termine par ces mots : « La Commission de Chimie, a eu, on le voit, beaucoup d'excellentes raisons pour retenir sa candidature à une place de Correspondant. » [Dossier Hagenmuller de l'Académie des sciences]. Il est alors très amusant que Galy, après sa dispute avec le patron, s'expatrie justement à Toulouse au LCC dirigé par Gallais, après la proposition de ce dernier.

¹⁵⁴ Une « répartition, par discipline, des articles publiés » dans les revues françaises de chimie (*Nouveau journal de chimie, Journal de chimie physique, Revue de chimie minérale, Bulletin de la Société chimique de France*) donne, pour la *Revue de chimie minérale*, le résultat suivant en 1980 : 18 des 20 articles se réfèrent à la « chimie du solide », 1 à la « chimie moléculaire minérale » et 1/2 à la chimie de coordination et à l'électrochimie. De 1982 à 1988, alors que le soutien du CNRS grimpe de 20 000 francs (34 000 francs 2000) à 118 000 francs (150 000 francs 2000), le facteur d'impact plonge de 1,015 à 0,578, la proportion d'articles refusés baisse de 35% à 14%, le nombre d'abonnements chute à 253 [CNRS, 1980 ; 1988].

¹⁵⁵ « Quand Silber a pris sa retraite, Chrétien a un peu paniqué pour l'avenir de sa revue et a demandé à Hagenmuller de reprendre le flambeau. Hagenmuller a dit "je veux bien à condition que quelqu'un s'en charge" et il m'a demandé de m'en occuper. Je me souviens du sourire de Chrétien quand j'ai accepté de reprendre le bébé. [...] elle aurait trois *editors*, c'est-à-dire trois rédacteurs au sens anglo-saxon : Roesky (université de Göttingen), un Allemand de la chimie de coordination, Kaldis en chimie minérale, de l'Institut de Zürich en Suisse et moi-même. L'éditeur était toujours Gauthier-Villars à ce moment-là, puis quand on est passé aux publications de langue anglaise – ce qui m'a d'ailleurs valu beaucoup de courriers de mes collègues qui me disaient que j'étais un traître à notre langue (rire) –, on commençait à être bien reconnu dans le *citation index*, Elsevier a racheté la revue. J'étais alors en fin de parcours, je pensais à ma retraite et j'ai demandé à mon ami Gérard Férey de prendre le relais, il a accepté en changeant le nom pour *Solid State Science* et le format. » [I Tournoux, 2006, p. 13].

universités provinciales.¹⁵⁶ Le calcul est habile car, au cours des années 1960, l'Université s'étend, surtout en province où il y a de la place et de la demande. Si le territoire compte une petite vingtaine d'universités et trois mille cinq cents enseignants vers 1950, on dénombre quatre-vingt-dix universités et soixante mille enseignants en 1995 [Renaut, 1995, p. 39]. Nantes, dont l'université vient d'être refondée entre 1959 et 1962 [Emptoz, 2002], est la première ville colonisée. En 1963, de retour de son service national en Algérie, Rouxel y décroche un poste de « maître de conférences » [Rouxel, 1985]. Aux portes de la Bretagne, il poursuit l'étude des sulfures métalliques de la période renaissance – à la suite des travaux de Flahaut qui a défriché le terrain au cours des années 1950 –, mais l'enrichit considérablement en développant les chalcogénures de « basse dimensionalité » [RA CNRS, 1983]. Trois ans plus tard, en 1966, Tournoux vient rejoindre Rouxel pour diriger un groupe de cristallographie des oxydes métalliques, d'abord orientée vers le thallium. Les deux groupes fusionneront bientôt pour former un laboratoire associé au CNRS, dirigé par Rouxel : le « Laboratoire des structures bidimensionnelles et rôle stéréochimique des doublets solitaires » (1974), qui aura un rôle primordial pour le développement de la « chimie douce » (VI.1).

L'essaimage se poursuit efficacement : Hardy est déjà professeur à Poitiers en 1969, de Pape laisse la direction du groupe du fluor à Portier (puis à son élève Tressaud) et part fonder le Laboratoire des fluorures au Mans ; Casalot et Galy quittent l'Aquitaine en 1975 – et même s'ils y sont poussés par des problèmes d'incompatibilité avec le maître –, vont participer à la propagation de l'école de recherche, l'un à Marseille où il prend la direction du Laboratoire de physico-chimie des matériaux, dans des conditions matérielles difficiles, l'autre à Toulouse où il intègre le Laboratoire de chimie de coordination (LCC), dirigé par Gallais¹⁵⁷ ; Naslain s'associe à la SEP pour monter le Laboratoire des composites thermosturcturaux (1988) ; Bernard Frit et Jean Pierre Bonnet rejoignent Limoges pour recréer un Laboratoire de céramiques nouvelles (qui existe en 1992) ; Jean-Marie Tarascon, ancien élève d'Étourneau émigré aux Laboratoires Bell pendant douze ans, remplace Figlarz (décédé en 1994) à la direction du Laboratoire réactivité et chimie du solide à Amiens. De plus, sans prendre la direction d'un laboratoire, de nombreux thésards bordelais intègrent un peu partout en France d'autres équipes universitaires, contribuant ainsi à la propagation de l'influence hagenmullerienne. Marc Drillon rejoint, à Strasbourg, le Laboratoire de Jean-Claude Bernier, un ancien élève de Michel, et y développe des matériaux hybrides organique-inorganique, plus proches de la chimie moléculaire. Ces quelques exemples repérables ne sont pas les seuls puisque, en 1977 déjà, Hagenmuller dénombre une vingtaine de ses anciens élèves dans les universités françaises ou étrangères. L'école de recherche *hagenmullerienne* associe un lobbying des institutions parisiennes à un développement dans les laboratoires provinciaux, mélange détonnant, original, qui profite d'une volonté politique de décentralisation de l'État jacobin. Si le Laboratoire bordelais en constitue le creuset principal, l'école de recherche le dépasse largement, non seulement en France mais encore à l'étranger (au Japon par exemple).

Pendant que Hagenmuller développe avec une abnégation de directeur-fondateur « son » Laboratoire, qu'il participe à de nombreux jurys de thèse, ses anciens élèves dispersent la bonne parole aux quatre coins de l'hexagone et outre-Mer, dans l'industrie ou les universités. Il est temps alors pour Hagenmuller de façonner sa propre statue du fondateur de la chimie du solide. L'expression « chimie du solide » couramment employée à Bordeaux

¹⁵⁶ « l'un des objectifs était de placer leurs élèves à l'université à tout prix. S'il y a une méthode Hagenmuller ou Collongues, c'est celle-là : "plaçons à tout prix nos bonshommes à l'université." » [I Caro, 2005, p. 12].

¹⁵⁷ Par la suite, Galy prendra la direction du « Centre d'élaboration des matériaux et d'études structurales » (CEMES) (1989-1996). Le CEMES résulte de la disparition du Laboratoire d'optique électronique fondé par Gaston Dupouy.

depuis la fin des années 1960 doit être marquée du sceau de Bordeaux. Le patron commence à la définir explicitement à partir de 1975. À chaque nouvelle notice qu'il rédige [1975, 1977, 1988, 1998], il associe toujours plus étroitement la chimie du solide à sa propre méthodologie et à sa personne, en effaçant les devanciers ou les contemporains.¹⁵⁸ Au cours des années 1980, il se sent suffisamment fort socialement pour revendiquer la paternité de la chimie du solide, en France, et sa co-paternité avec Goodenough au niveau international.¹⁵⁹ Il est vrai qu'il domine alors car il « tient » la plupart des institutions françaises : président du Comité de prospective de chimie du solide et de métallurgie (1974-1977), président-fondateur de la division chimie du solide et métallurgie de la Société française de chimie (1977-1978), promu correspond à l'Académie des sciences (1978), et surtout deux fois président de section du Comité national du CNRS, « chimie des matériaux solides » (1976-1979) puis « chimie et physico-chimie des matériaux inorganiques » (1983-1986). Il en profite pour imposer sa perspective historique, son point de vue dans les commissions auxquelles il participe. En 1988, il décrit la chimie du solide comme « la discipline qui définit les corrélations entre la composition et la structure des matériaux et leurs propriétés physiques ou mécaniques [corrélations qui permettent *in fine* de] prédire [les] propriétés [du solide], donc de les améliorer en modifiant les données de départ » [Hagenmuller, 1988], ce qui n'est autre que la méthodologie qu'il a appliquée à partir du milieu des années soixante. La statue du fondateur est bientôt fondue dans le bronze de la matière.



¹⁵⁸ La dernière notice qu'il rédige en 1998 marque la consécration rhétorique de son travail : « *Paul Hagenmuller is largely recognized internationally as one of the founders of modern solid state chemistry, i.e. a research field where composition and structure of the materials on one hand, physical or mechanical properties on the other hand can be correlated.* » [Hagenmuller, 1998, p. 1]. Et lui-même aime à dire qu'il a été le « père » de tous les chimistes français et qu'il a fourni son aide à chacun.

¹⁵⁹ Sa démarche est d'autant plus habile que premièrement, il alterne les versions « *soft* » où il n'est qu'un parmi d'autres, aux versions « *hard* » où il se trouve seul sur le piédestal, et deuxièmement, certains de ses élèves, devenus à leur tour influents, propagent la deuxième version. Effet boule de neige garanti !

IV.4.3. Entre bronze minéral et chair organique, Paul Hagenmuller : un « personnage » extra-ordinaire

L'histoire du laboratoire de Bordeaux est un cas exemplaire de communauté locale forgée autour d'une personnalité, Paul Hagenmuller. Par sa stature scientifique, son esprit d'entrepreneur, son sens politique, sa force de persuasion musclée, il a su monter une équipe associée à un projet fort et cohérent, et rayonner. Ce n'est pas lui faire offense que d'écrire qu'il a construit un empire scientifique sur une mer pleine (de concurrents) en naviguant à vue (par rapport à ce qui se faisait ailleurs), changeant de cap par stratégie (édition internationale mais *lobbying* national) ou par hasard, en suivant des intuitions (physiciens, instruments), en prenant garde aux sirènes industrielles (crise économique) tout en sous-estimant (comme la plupart) les écueils écologiques. Hagenmuller a insufflé une logique systématique à son Laboratoire, qu'il a organisé pour quadriller au mieux l'espace « élémentaire » du tableau périodique et qui a finalement conduit à la synthèse d'un nombre incalculable de composés nouveaux à Bordeaux (plus ou moins intéressants d'ailleurs). Quand un personnage enfle à ce point dans un monde (universitaire) certes ouvert mais fortement contingenté en ressources, il est plus que probable que l'entreprise s'accompagne d'un étouffement, d'une restriction de l'espace vital pour les concurrents, et d'un inextinguible sentiment d'injustice. Je crois n'avoir pas assez insisté sur l'envers du décor mais les témoignages des concurrents sociaux en disent long là-dessus.

Intelligent, brillant et irrationnel, Hagenmuller est un travailleur acharné, voyageur infatigable. Curieux, il s'est frotté au monde, aux cultures mais encore plus aux êtres humains. Il a forgé sa personnalité au travers de quelques épreuves de l'histoire tragique du XX^e siècle, nazisme, colonialisme et stalinisme, ce qui l'a indubitablement endurci. Pragmatique, il a su tirer parti des grands mouvements de balancier de son époque – capitalisme/communisme, fondamental/appliqué, Paris/province, physique/chimie – et il a adhéré pleinement au gaullisme des années glorieuses. En contrepartie, il est resté sourd à certaines des mutations en cours : la place des femmes au laboratoire – aucune durant les dix premières années ! –, le rôle des techniciens, la gestion d'une ouverture démocratique contre une hiérarchie traditionnelle. Il a refusé certaines évolutions autour de lui : la microscopie électronique, l'étude de la matière amorphe, la mise en forme... Avidé de pouvoir, il a souvent imposé ses volontés, écrasé bien des concurrents ; il a beaucoup joué avec les hommes, qui en contrepartie se sont quelquefois joués de lui. Il n'a pas réussi sa succession, s'est brouillé avec certains de ses élèves. Par calcul politique, il a su se créer des occasions, il en a saisi d'autres sans ambages. Habile en rhétorique il a pu convaincre et il aimait à dire avec humour : « je suis amené tellement souvent à écrire que mes élèves sont intelligents qu'ils finissent par le croire ». Utilisant les ficelles du discours, il a construit une redoutable propagande pour imposer « sa » chimie du solide, celle qui se définit suivant sa propre méthode et dont il serait le « fondateur ». Conteur captivant, féru d'histoire, il a d'ailleurs partiellement atteint son but, surtout parmi ses héritiers, puisque dans l'imaginaire communautaire, il reste le principal pivot du destin qui, « visionnaire », a fait advenir l'avenir à la force de son poignet, de son esprit et de sa langue. Le 16 mai 1997, pour son « jubilé », devant le « gratin » de la recherche française et de la communauté internationale du solide, Paul Hagenmuller prononce une phrase extrêmement touchante : « Je demande pardon à ceux que j'ai pu offenser pendant ma carrière scientifique, quel qu'ait pu être mon désir d'aider les plus faibles et les plus malheureux. » Phrase admirable qui pourrait en un raccourci fulgurant résumer le personnage : philanthrope et mégalomane.

Un tel personnage suscite d'épineuses questions pour l'historien. J'en préciserai ici deux qui me tiennent à cœur. Premièrement, il est troublant de voir à quel point il est facile de réécrire l'histoire en permanence et en si peu de temps. N'est-ce pas d'ailleurs le meilleur gagne-pain de l'historien ? Mais là, l'anamorphose discursive est édifiante : d'un jeune professeur se réclamant de la chimie minérale *chrétienne* orthodoxe (1960) à un visionnaire rompant avec l'obscurantisme et les préjugés de la tradition pour accomplir le destin de la chimie du solide (1998).¹⁶⁰ Quand on trouve une logique a posteriori à un foisonnement indéterminé de l'instant, il est plus facile de se dire « visionnaire » et d'être cru. Mais face à un monde complexe qui nous fait face, bien malin celui qui annonce avec assurance et justesse ce que feront les trois Parques. Le jeu de la réécriture est sans fin. Il n'oblige pas à renoncer aux idoles qui, dans chacune de nos têtes, se sont fabriquées peu à peu pour y souffler, de leur piédestal plus ou moins instable, quelques interprétations de nos mondes. Savoir que nous cultivons tous nos idoles – celui qui dit ne croire en rien, ne croit-il pas quand même qu'il ne croit pas ? – permet au moins de ne pas nous figer sur « le » récit que nous attendions et de rester circonspect quand nous entendons parler d'« objectivité ».

Deuxièmement, cette réécriture est d'autant plus crédible que le ré-écrivain est un personnage sérieux, qui a réussi socialement, dans un domaine qui aime à se dire « rationnel ». Or, être cru, n'est-ce pas finalement avoir raison ? Raisonnement de sophiste certes mais face à l'introuvable « Raison », que reste-t-il comme certitude ? Je gage qu'aucun lecteur ne sera de bout en bout d'accord avec ce texte – je ne prends pas beaucoup de risque – mais tant mieux ! L'histoire a-t-elle vocation à être plus convergente, plus consensuelle à chaque réécriture ? L'objectif est-il ce récit unique, non problématique, terrible réducteur des possibles sur lequel aurait tranché l'Histoire ? Comment concilier une communauté, qui cherche le vrai par consensus, à une méthode historique de la différence, de la contradiction et de la « mise en intrigue » (Paul Veyne). Qui a raison en histoire – et même en sciences – si ce n'est celui qui est cru ? Pas cru par la seule puissance du verbe comme on le reprochait aux sophistes mais cru par tout un tas de machinations qui s'agencent bien – « logiquement » ou « rationnellement » ont tendance à dire les scientifiques – : mots, équations, courbes. Y a-t-il des témoins du rationnel ? Les instruments de torture de la matière ? Ils sont tout emplis des représentations de ceux qui les ont construits. Il y aurait bien peut-être les solides eux-mêmes ? Oui, mais eux sont oubliés sur quelque étagère, perdus au fond d'une poubelle, laissés dans les caves pour faire l'étonnement des archéologues des sciences à venir. On ne les atteint que par le truchement de multiples détours sociaux et cognitifs. En irait-il de même en histoire comme dans une mauvaise démocratie : à pensée unique, récit unique ?

¹⁶⁰ Hagenmuller cite Chrétien et Rohmer dans sa première *Notice* [1960] au moment où sa carrière débute, il peut difficilement ne pas mentionner son directeur de thèse. Par la suite, le nom du maître disparaît [1978, 1988 1998] ce qui contraste évidemment avec la *Notice* de Collongues [1979] qui commence par un vibrant hommage au patron. Dans ses interviews, Hagenmuller le cite une fois en 2001 mais plus en 2005 durant plus de quatre heures de discussion. Outre l'opposition personnelle au « père » Chrétien, le chercheur mature cherche aussi à effacer les années de jeunesse – consacrées à la chimie en solution – pour ne donner à voir que la statut du chimiste du solide.

Conclusions

1°) Diversité des « programmes de recherche » et diffraction des rayons X

Chacun des laboratoires étudiés présente un « programme de recherche » local, qui lui est propre. En cela, probablement, chaque laboratoire développe, à des degrés divers, une « école de recherche » [Geison, 1981]. Au-delà de leurs différences structurelles, je vois trois éléments essentiels qui rendent possible cette spécificité entre 1950 et 1980 : l'absence de dogmes communautaires avant la fin des années 1970, une remarquable longévité des directeurs de laboratoire, une faible mobilité des étudiants et des chercheurs d'une école à l'autre. Seul le premier élément est caractéristique d'une discipline émergente, les deux autres étant plus liés à la situation française d'après-guerre.

Résumons les programmes de chacun. Premièrement, l'approche *élémentaire*. Flahaut s'efforce de défricher le champ des sulfures, d'abord avec les métaux de transition, éléments couramment étudiés, puis avec les terres rares, glissement encouragé par l'importance accrue de cette famille élémentaire. L'arpentage du domaine est plus accidentel que systématique : étudier un nouveau composé binaire, ternaire ou quaternaire, fournit plus l'occasion de tracer des diagrammes de phase de plus en plus fouillé (qui recèle éventuellement des verres) qu'accomplir un programme préétabli. Au cours des années 1960 et 1970, la communauté est friande de diagrammes de phase parce qu'ils assurent une bonne connaissance du lien entre composition et structure, et favorisent l'originalité chimique. La sixième saison des Séminaires de chimie de l'état solide (1971-1972) est d'ailleurs consacrée aux « Diagrammes de phase et stœchiométrie » [Suchet, 1973] (VI.2.1.2). Par la suite – à partir des années 1980 –, les diagrammes de phase intéressent moins les solidistes lorsque les propriétés physiques constituent le nœud de leur matrice disciplinaire.¹⁶¹ Ce désintérêt collectif est palpable au niveau des institutions avec la fin de l'association au CNRS du Laboratoire de chimie minérale et structurale, en 1992. Le Laboratoire existe encore à la faculté de pharmacie mais les recherches, réorientées vers les fullerènes, s'y poursuivent avec des effectifs et des moyens faméliques. En restant plus fixé sur le lien composition-structure (que les autres), le LCMS s'est éloigné du cœur de la communauté de chimie du solide (dont la matrice disciplinaire s'est décalée vers la double relation).¹⁶² Il semble que le désintérêt pour les diagrammes de phase est spécifique à la chimie du solide. En effet, des domaines comme les ciments, l'industrie nucléaire continuent, même aujourd'hui, à tracer de nombreux diagrammes de phase.

Ensuite, l'approche *élémentaire-instrumentale*. Trombe a suivi l'orientation fixée par son maître Urbain à la fin du dix-neuvième siècle en se focalisant sur une famille très

¹⁶¹ « Pour donner l'exemple des diagrammes de phase, certains laboratoires jusque dans les années 1980, celui de Flahaut entre autres, faisaient des diagrammes de phase de nombreux produits mais ils ne s'intéressaient pas aux propriétés. Ils appliquaient une méthode unique sur des composés différents, sans surprise. C'était de la science des composés » [I Vivien, 2004, p. 19].

¹⁶² Une nouvelle fois, mon approche se veut agnostique, mon critère n'étant pas la vérité, et ne cherche pas à fustiger les perdants sociaux. Pour tout un tas de raisons, ces derniers auraient pu gagner et la chimie du solide aurait alors été autre ou même pu ne pas être du tout. D'un autre côté, je ne dis pas que le Laboratoire n'a pas étudié la relation structure-propriétés : il l'a juste fait moins que les autres ou les autres ont juste pensé qu'il le faisait moins qu'eux. Alors, la déviance (vis-à-vis du dogme épistémologique) justifiait la dégénérescence (sociale) du « programme de recherche ».

particulière : les terres rares métalliques et leurs composés ioniques. Leur intérêt international est relancé par l'effort de guerre états-unien. Le choix « élémentaire » du Laboratoire des terres rares a deux conséquences instrumentales fortes, liées à la similarité des propriétés chimiques de ces éléments. Premièrement, le recours à des techniques de synthèse et de séparation très pointues, qui évoluent de la recristallisation fastidieuse (milliers de cycles) d'entre-deux-guerres aux méthodes par résines échangeuses d'ions, appliquées lors du projet Manhattan. Les résines échangeuses d'ions sont mises en place au Laboratoire dans la décennie qui suit la Deuxième Guerre mondiale. Deuxièmement, l'emploi de la spectroscopie pour identifier les éléments puis étudier leurs comportements au sein de matrices cristallines. L'exemple du groupe Caro, aux prises avec les oxydes (isolants) des terres rares, met en évidence une mathématisation de la chimie – en provenance des États-Unis – à la fin des années 1960, nécessaire pour approfondir l'interprétation des spectres optiques (théorie des groupes). Cette mathématisation induit finalement des possibilités de modélisation, renforcée par l'avènement de l'informatique au cours des années 1980 surtout. La localité des phénomènes dans les oxydes de terres rares conduit l'équipe Caro à maîtriser la microscopie électronique dès 1970, ce qui est très tôt pour les chimistes. Une analyse atomique de la structure cristalline devient ainsi possible. Le lourd système mathématique qu'elle nécessite a déjà été en partie acquis grâce à la spectroscopie. L'investissement matériel conséquent est assuré par le soutien du CNRS et les collaborations avec les physiciens. Même si le LTR met son savoir-faire instrumental et mathématique au service de la communauté de chimie du solide (par des collaborations), il reste marginal : exilé à Bellevue, à la frontière entre métallurgie et chimie – à sa manière il défend une autre « chimie métallurgique » que celle du CECM –, peu intéressé par les applications, focalisé sur une famille élémentaire qui n'intéresse pas tous les pays au niveau international.¹⁶³

Troisièmement, l'approche *instrumentale-historique*. Collongues est chargé par Chaudron de la « transposition » – déjà bien entamée par Forestier, Bénard et Michel – des pratiques métallurgiques à l'étude des oxydes de fer non stœchiométriques. Sa stratégie de développement se base essentiellement sur une recherche fondamentale avec un intérêt – même lointain – pour les applications industrielles : réfractaires, conducteurs ioniques, matériaux laser. L'enchaînement pourrait paraître erratique mais il est sous-tendu par une logique instrumentale associée à une réutilisation des savoir-faire antérieurs et, dans la mesure du possible, à un contournement des thèmes à la mode. En effet, Collongues, qui a sous la main (au CECM) les techniques de haute température des métallurgistes, encourage l'étude des réfractaires, ce qui le conduit à développer de manière pionnière pour la chimie française (avec Trombe) une cristallogenèse efficace, adaptée à de multiples composés ioniques. Lorsque des chercheurs de Ford mettent en évidence la forte conductivité ionique de l'alumine bêta, dont l'équipe avait étudié la structure comme réfractaire, le patron n'évite pas le thème à la mode des piles à combustible et oriente son équipe vers la superconduction ionique. Quand l'intérêt des industriels s'essouffle, c'est l'implantation d'une nouvelle technique – la RPE – au laboratoire qui permet de relancer le laboratoire en exploitant un effet laser observé dans une matrice voisine de l'alumine bêta et dopée aux terres rares. Collongues et son équipe procèdent donc par accumulation et réutilisation des savoir-faire instrumentaux dont ils disposent, sans préjuger d'un programme « élémentaire ». Même si les oxydes constituent leur domaine privilégié, ils étudient aussi les nitrures, les pyrochlores... Profitant de la puissante *Chaudronnerie* dont il est issu, Collongues dispose d'une envergure nationale

¹⁶³ « PT : *Quels sont les pays qui ont compté dans votre domaine ?* – PC : Par ordre d'importance, je dirais les États-Unis puis la France, (avec la Belgique, la Suisse, l'Espagne), en ce moment, la Chine et le Japon sont très performants. Le Brésil et l'URSS en son temps, ont fait des choses intéressantes aussi. – PT : *Vous n'incluez pas les Britanniques ni les Allemands ?* – PC : Non, ils n'étaient pas très intéressés par les terres rares. » [I Caro, 2005, p. 15].

suffisante pour imposer – avec d'autres – une méthodologie d'étude des solides mais pas suffisante pour fixer les contours de la chimie du solide. En effet, la chimie de l'état solide (et la chimie appliquée de l'état solide) qu'il défend avec force jusqu'au milieu des années 1970 perd du terrain devant la chimie du solide orthodoxe : la continuité épistémologique de l'état solide – institutionnellement incarnée par la chimie métallurgique de Chaudron – n'est pas compatible avec une dualité sociale entre chimie du solide et métallurgie chimique. Au demeurant, les deux entités restent associées au sein des sections du CNRS successives, mais avec une prédominance sociale de la chimie du solide.

Quatrièmement, l'approche *systematique élémentaire*. Venu de la chimie minérale, Hagemuller concentre son attention sur les seuls solides ioniques : ni métal, ni métalloïde ne se trouve au cœur de son programme de recherche.¹⁶⁴ Il ne cherche jamais à s'allier à la chimie de l'état solide ni à pénétrer la communauté des hautes températures. Il ne fait pas partie de l'*intelligentsia* parisienne : *Chaudronnerie*, familles Trombe et Lebeau. Même si les « Bordelais » sont éventuellement convaincus par une continuité épistémologique du solide, encore aujourd'hui, ils prennent soin dans leurs témoignages de distinguer la « métallurgie », la « céramique » et la « chimie du solide ». Si Hagemuller se restreint aux seuls composés minéraux, c'est pour mieux les étudier tous. Par cette stratégie – de densification des études sur un type de solide –, le programme de recherche bordelais a défini et clôturé un espace chimique à défricher : les solides minéraux. En voulant plus ou moins consciemment renverser la *Chaudronnerie* (dominante) et écraser la *Chrétienté* pour assouvir ses ambitions et régler des comptes, Hagemuller a choisi l'option « élémentaire », héritée de la *Chrétienté* – par opposition à une chimie de l'état solide –, en la systématisant.

Malgré les différences locales, le programme de recherche des quatre laboratoires envisagés précédemment converge sur une technique commune : la diffraction des rayons X. Celle-ci devient indispensable à l'étude chimique des solides. Alors que certains l'ont développée depuis longtemps (CECM), que d'autres se débrouillaient pour collaborer avec les cristallographes, tous les laboratoires de chimie de l'état solide se dotent progressivement d'appareils de diffraction de rayons X.¹⁶⁵ Elle devient leur technique de base, décomplexe les chimistes et leur donne confiance. La symétrie (cristalline) devient le maître mot en chimie du solide. S'il y a accord entre les calculs obtenus en partant d'une structure hypothétique et les résultats expérimentaux du spectre, c'est qu'on a trouvé la structure « juste ».¹⁶⁶ Ce point de vue rejoint celui des cristallographes. À la diffraction des rayons X correspond le solide cristallin (polycristallin puis monocristallin). Au cours des années soixante, tous les solides dont on ne peut déterminer la structure – comme les verres – sont considérés avec dédain par le dogme communautaire (VI.1).

¹⁶⁴ Je pense que le cas des carbures, étudiés au Laboratoire des composés thermostructuraux de Naslain, ne constitue qu'un cas particulier parmi les « Bordelais », plus imposé par l'extérieur – applications aéronautiques – que par la systématique *hagemullerienne*.

¹⁶⁵ Le témoignage de Hérold est ici emblématique : « à Mulhouse, au cours des années 1950, je demandais au cas par cas, à l'un ou l'autre pour l'étude structurale de nos composés pour les rayons X (méthode de Debye-Scherrer). » [p. 5] « À Nancy, à cette époque [1961-1966], nous disposions de la diffraction des rayons X au laboratoire et nous avons pu faire pas mal de cristallographie. [...] Pour nous, les équipements de rayons X sont venus plus tard, ils ont été installés au laboratoire au début des années soixante, quand je suis arrivé à Nancy, comme ça faisait suite au Plan d'équipement lancé par de Gaulle après son arrivée au pouvoir. » [I Hérold, 2007, p. 3-4].

¹⁶⁶ « La cristallographie est tellement précise qu'elle est juste, elle ne peut pas être fautive si on arrive à un bon accord entre les mesures que l'on fait et le calcul [...] La diffraction est une science exacte parce qu'une structure ou elle est juste ou elle est fautive, il n'y a qu'une seule solution et pas deux. » [I Galy, 2006, p. 26].

Est-ce que les quatre laboratoires-types suffisent à couvrir l'ensemble des laboratoires de la chimie du solide en France ? Rien n'est moins sûr. Certes, chacun des quatre types est présent à des degrés divers dans les autres laboratoires. Il est même possible d'associer les deux premiers types à d'autres laboratoires. C'est le type « élémentaire » qui paraît être le plus courant parce que, pour les petits et moyens laboratoires – numériquement les plus nombreux –, il est plus facile de se focaliser sur une famille composés.¹⁶⁷ Pour les diagrammes de phase, le laboratoire de la faculté de pharmacie est rejoint par celui de « chimie minérale » à Lyon, dirigé par Roger Cohen-Adad à partir des années 1960. Le type « élémentaire-instrumental » quant à lui peut être élargi si on remplace « élémentaire » par « état » (comme l'amorphe) ou par « propriétés » (optique ou mécanique) physiques.¹⁶⁸ Tout expérimentateur a, je pense, tendance à réutiliser le savoir-faire acquis (en lien avec les instruments qu'il maîtrise) mais, dans le cas de Collongues, cet effort me semble typique parce que chaque nouveau grand cycle décennal découle d'un réinvestissement antérieur. Je n'ai pas trouvé de laboratoires où cette pratique – économique et efficace – était aussi visible. L'approche de systématique élémentaire est réservée aux laboratoires qui ont le plus de moyens. Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, le LCS est probablement le seul à pouvoir le faire (avec le CECM).

2°) Du laboratoire au territoire national : victoire des outsiders de province sur la tradition parisienne ?

Le LCS constitue le principal outil des ambitions disciplinaires de Hagenmuller. Alors que Flahaut, Trombe et Collongues visent d'abord à la production de connaissance dans un champ disciplinaire donné, Hagenmuller développe une autre ambition au cours des années soixante, celle de marquer l'espace institutionnel en fondant une nouvelle discipline, la « chimie du solide ». Autour de cette appellation simple – beaucoup plus parlante que « chimie appliquée de l'état solide » ou même que « chimie de l'état solide » –, Hagenmuller désire fédérer les laboratoires de chimie en une communauté universitaire. Sa « matrice disciplinaire » [Kuhn, 1970] devra correspondre au « programme de recherche » de l'école bordelaise. Selon cette perspective – du local au global –, la chimie du solide émerge comme la fédération sociale et politique de laboratoires indépendants (aux projets spécifiques) en un État national, bientôt régi par une constitution (dogme méthodologique) qui se présente comme commune mais qui doit beaucoup à l'école bordelaise.

Comment le parti de la chimie du solide a-t-il réussi son coup d'État en renversant les partisans de la chimie de l'état solide, alors en place ? La question est d'autant plus troublante que le renversement n'est pas consciemment perçu par les acteurs alors qu'il induit un bouleversement à tous les niveaux. Au niveau épistémologique, la succession chimie minérale, chimie de l'état solide, chimie du solide correspond à la séquence suivante :

¹⁶⁷ Parmi les laboratoires « élémentaires », on peut citer, les deux nantais avant qu'ils ne s'associent en 1974 : celui de Rouxel sur les chalcogénures (à la suite de Flahaut), celui de Tournoux sur les oxydes, celui de de Pape au Mans sur les fluorures, celui de Rennes (Lang, Marchand) sur les nitrures. À Nancy, on trouve un laboratoire composé d'un groupe étudiant les oxydes métalliques (Aubry) et d'un groupe concentré sur les composés du graphite (Hérol).

¹⁶⁸ Je rangerais dans le type « élémentaire-instrumental » les rejets du Laboratoire des terres rares, dans « propriété-instrumental » celui de « physico-chimie des matériaux luminescents » (ER en 1968) fondé par Françoise Gaume à Lyon, ou celui des composites thermostrostructuraux à Bordeaux (Naslain) pour son approche mécanique. Enfin, le Laboratoire des verres et céramiques (Lucas) à Rennes incarne le type « état-instrumental » par son étude focalisée sur les amorphes pendant son heure de gloire.

élément (1945) → état (1955) → élément* (1975)

Double étonnement introduit par cette lecture. Ce qui surprend d'abord est le retour de l'élément en chimie du solide. Alors que la chimie de l'état solide s'était construite sur la primauté de l'état physique – continuité de l'état solide du métalloïde au minéral – après-guerre (III.4.1), la chimie du solide choisit une orientation résolument élémentaire : celle des solides minéraux lors de l'apogée de la chimie du solide (1975-1980). « élément* » signifie que le retour à l'élément s'est accompagné de transformations : il ne s'agit plus de la chimie minérale d'entre-deux-guerres. Ce qui étonne ensuite est l'invisibilité du processus dans le témoignage des acteurs eux-mêmes. Ceux qui ont vécu et défendu la chimie de l'état solide ne sont plus là pour témoigner : qu'ils soient décédés (qu'aurait pensé Chaudron d'une telle interprétation ?) ou sortis de la communauté (Bénard n'est pas souvent reconnu comme chimiste du solide par les solidistes alors qu'il est considéré comme « métallurgiste » par les métallurgistes), qu'ils aient été bâillonnés (aucune notice de Trombe par exemple à l'Académie des sciences) ou amnésiques (quand il voit que la chimie du solide a vaincu, Collongues [1979] époussette soigneusement sa notice et se réclame de la « chimie des matériaux » et non pas de la chimie du solide, ce qui est très intéressant) au sein de leur propre communauté. Le récit légendaire gomme lui-aussi la chimie de l'état solide au profit d'une histoire plus simple qui fait directement passer de la chimie minérale « vieillot » et descriptive à une chimie du solide rationnelle et prédictive. Le récit légendaire suit le schéma classique d'un « progrès » linéaire, de la croyance à la connaissance, sans possible bifurcation, alternative ou retour en arrière cognitifs.

Comment, au niveau social, comprendre la création d'une chimie du solide plutôt que la transformation du réseau de chimie de l'état solide (II.4) en une communauté ? Je répondrai à cette question cruciale par cinq points. Premièrement, l'école bordelaise a connu une fulgurante ascension sociale en une vingtaine d'années (1960-1980). La personnalité de Hagenmuller y est pour beaucoup. À mi-chemin entre le « scientifique-entrepreneur » d'après-guerre et le « scientifique-administrateur » des années soixante [Jacq & Pestre, 1996], il apparaît comme un meneur d'hommes hors pair et un homme de pouvoir.¹⁶⁹ Il utilise tous les moyens qui sont à sa disposition pour imposer son empire. Au niveau des institutions scientifiques nationales, il se montre intraitable et dispose d'un pouvoir hégémonique, que personne n'ose lui contester frontalement. Il a repéré les rouages de régulation de la science nationale et devient un expert pour les retourner à son avantage.¹⁷⁰ Il sait aussi utiliser les

¹⁶⁹ Hagenmuller « était un manager hors pair. Je crois qu'il aurait pu réussir dans n'importe quel domaine où il faut des managers. » [p. 2]. « Pour Hagen, c'est tout pour moi, rien pour les autres mais si on le sait dès le départ, il n'y pas de problème. » [p. 5] « quand Hagen était président de commission et avait un vrai pouvoir dans notre système. » [p. 6] « On était deux dans ce cas-là : il y avait Raveau aussi sur sa *black list* avec moi. » [I Lucas, 2005, p. 7]. « Il avait un tel pouvoir que les gens ne voulaient pas lui déplaire, certains chercheurs des laboratoires extérieurs par exemple ne citaient pas mes publications sur les oxydes de vanadium pour ne pas déplaire à Hagenmuller » [I Galy, 2006, 9].

¹⁷⁰ « Dans l'histoire du CNRS, on est facilement juge et partie, c'est-à-dire qu'on s'autogère au travers des commissions CNRS et du comité national, divisé en 25 ou 30 sections dont celle de chimie du solide. Hagen avait compris le truc, que tout se passait là, les postes et le fric. Selon les bonnes traditions républicaines, il y a des corps : corps des techniciens, des maîtres de conférence, des chargés de recherche, des ingénieurs, des profs qui ont chacun leurs élus, soit une trentaine de personnes au total qui donnent leur avis, qui analysent des dossiers, qui sont les gestionnaires du portefeuille. À la plus belle époque d'Hagen, il avait réussi à se débrouiller pour qu'il y ait 5 bonshommes de Bordeaux sur les 15 que comptait cette commission de chimie du solide. Lui-même avait été nommé par le ministre, d'autres avaient été élus. Je me souviens d'un ingénieur, un brave gars, qui avait quitté Rennes pour Bordeaux et que Hagen avait convaincu d'adhérer à la CGT et au PC – parce qu'à l'époque, pour pouvoir être élu dans le corps des techniciens, il fallait être quasiment *cgtiste* –. Ils avaient donc

financements de la Région et obtenir le soutien de la mairie de Bordeaux. Comme le « duc d'Aquitaine » [Mabileau, 1973, p. 2] son allié – le député-maire de Bordeaux Jacques Chaban-Delmas – Hagenmuller profite du mouvement de décentralisation politique en France. Sa rupture avec son maître l'a obligé à quitter la capitale. Alors qu'un poste en province a longtemps été vécu comme un ostracisme vis-à-vis de la Sorbonne (I.3.1), les jugements de valeur évoluent et la province offre un nouvel espace de croissance. Des quatre mandarins évoqués ici, Hagenmuller est le seul à quitter la région parisienne contrairement à Trombe, Collongues et Flahaut qui restent en région parisienne. Sa rupture avec la Chrétienté constitue une chance de ce point de vue parce qu'elle lui permet de couper avec la logique parisienne des familles traditionnelles. La chimie du solide participe du redéploiement géographique de la politique scientifique de la France des années soixante.¹⁷¹ Le pari de la province est payant. La différence d'effectifs à la fin des années 1970 est éloquente entre les divers laboratoires : en 1975, on dénombre quatre-vingt-trois membres au LCS (dont 30% d'ITA et 18% de thésards) et soixante-treize au LTR (42%, 12%). En 1976, ils sont cinquante-deux au LCMS (23%, 38%); en 1980, trente-cinq seulement au LCAES (22%, 22%).¹⁷² Les plus gros chiffres correspondent aux deux laboratoires propres mais la similitude est trompeuse : le LCS est en plein développement (15 ans d'âge, 30 membres de plus 7 ans plus tard) alors que le LTR est en bout de course (créé en 1945, il va disparaître en 1977). En revanche, la répartition des membres est similaire pour les deux laboratoires propres : un personnel ITA nombreux (au-delà de 30%) et un faible taux de thésards (moins de 20%) – d'autant plus accentué que le laboratoire est éloigné des universités –. Les laboratoires associés sont moins riches en personnel technique (22 à 23%) mais recrutent plus de thésards (plus de 20%) s'ils sont proches de l'université. Le LCS apparaît pour beaucoup de témoins comme une « usine à thèses ».¹⁷³ Et en effet, on peut estimer le nombre de docteurs formés au Laboratoire à trois cents environ durant vingt-cinq ans (1960-1986), à comparer aux soixante-dix formés sous l'égide de Collongues (1955-1988). Par son discours, Hagenmuller les prépare aussi à la suite de la carrière, leur apprend à manœuvrer dans la communauté. Il commence par choisir judicieusement les « notables » pour le jury des thèses.¹⁷⁴

été 5 dans la commission, c'est du *self service* comme au *MacDo*. Je dis que je ne suis absolument pas d'accord avec ces pratiques. Quand on a bien perçu les rouages du CNRS et mis la main là-dessus, on peut devenir l'empereur. Je pense que les mandarins soviétiques et chinois n'étaient rien du tout à côté d'Hagen. À un moment, il était même dans les deux commissions, celle de la promotion des profs – le CNU (Conseil national des universités) – et celle la nomination des membres du CNRS. » [I Lucas, 2005, p. 13]. Rouxel et Portier sont membres du Comité national que Hagenmuller préside entre 1975 et 1978.

¹⁷¹ « S'il y a une méthode Hagenmuller ou Collongues, c'est celle-là : "plaçons à tout prix nos bonshommes à l'université." Vous savez que le résultat de cela a été que la chimie du solide notamment, et presque la chimie en général, est devenue une discipline bien répandue dans les provinces, un système féodal bien dispersé alors que la physique par exemple est un système linéaire, sur l'axe Grenoble-Orsay. La chimie est plus équilibrée avec les provinces. » [I Caro, 2005, p. 12].

¹⁷² Les résultats sont issus des rapports d'activité de laboratoire. Pour le LCMS, ils prennent compte la fusion avec l'équipe de physique (8 membres et 7 thésards), pour le LCAES, les chiffres concernent l'ensemble du LA n°302 avec les groupes Collongues, Livage et Huber.

¹⁷³ « Je reconnais que les laboratoires de Collongues et d'Hagenmuller avaient une capacité de formation en élèves extrêmement bien au point, c'était des usines à thèse. Ils fabriquaient des thésards qui étaient bien sous tous rapports et qui allaient ensuite occuper les postes de l'université ou même les postes du CNRS. » [I Caro, 2005, p. 12].

¹⁷⁴ « c'est Hagen qui nous a éduqués scientifiquement, qui nous a appris comment vivre dans le milieu, donné des exigences de rigueur très sévères, qu'on n'a pas toujours pu maintenir au même niveau dans nos laboratoires. [p. 8] « Dans mon jury de thèse, il y avait Chaudron comme président du jury – je crois qu'il s'est endormi à ma thèse sans doute parce qu'il était déjà bien âgé –, Collongues, Pacault. Les notables quoi ! Il y a lieu de remarquer que Hagenmuller a toujours eu un grand souci de rigueur d'exigence et aussi d'efficacité pour l'avenir dans le choix de la composition des jurys. » [I Tournoux, 2006, p. 6].

Deuxième point : un effet d'échelle amplifie l'écart en terme de production scientifique. Les fortes disparités dans la taille des laboratoires – du simple au triple entre le LCAES et le LCS en 1980 ! – sont encore accrues au niveau du nombre des publications. Pour l'année 1980, un recensement, interne au CNRS, de la section 11 – chimie des matériaux solides – donne les résultats suivants : 93 publications pour le LCS (soit 0,8 publication par membre) ; 9 pour le groupe Caro (0,36)¹⁷⁵ ; 28 pour le LCMS (0,57) ; 18 pour le LCAES (0,51) [CNRS, 1980]. Il semble donc qu'un gros laboratoire – ici le LCS – a plus de capacité relative à publier qu'un petit. Malgré plusieurs limites,¹⁷⁶ l'analyse quantitative du CNRS fournit un instantané intéressant de la communauté. Mesure de l'importance en terme de publications des différents laboratoires (associés et propres), elle permet de proposer une cartographie de la chimie du solide vers 1980,¹⁷⁷ une quinzaine d'années après celle de 1964 (III.3.2.4).

¹⁷⁵ La faiblesse du chiffre pour le groupe Caro est sans doute due à l'histoire du LTR qui vient d'être dissous en 1977.

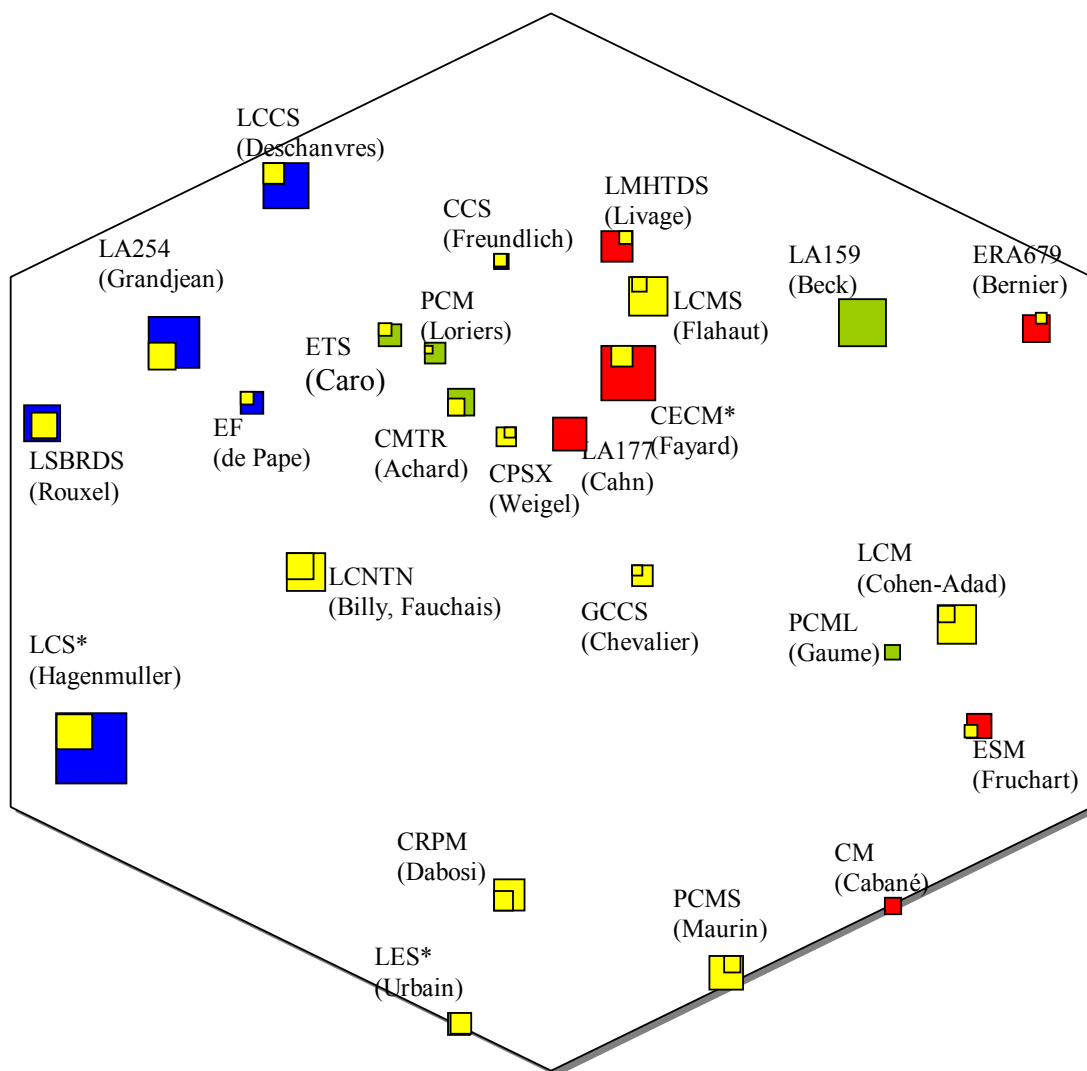
¹⁷⁶ Premièrement, le seul nombre de publications ne suffit pas à définir l'impact d'un laboratoire – d'autant plus s'ils sont erronés pour certains (artificiellement gonflés ?) –. D'autres facteurs auraient pu être convoqués : qualité des articles (par l'*impact factor*), les positions institutionnelles des membres, les communications orales... Ensuite, seuls sont référencés ici les laboratoires ou équipes associés ou propres, les laboratoires universitaires purs n'apparaissant pas contrairement au classement de 1966.

¹⁷⁷ L'aire est proportionnelle au nombre de publications pour l'année 1980. Le carré principal indique le nombre total, sa couleur la filiation éventuelle : bleu pour *Chrétienté*, rouge pour *Chaudronnerie*, vert pour Trombe, jaune pour les autres. Le carré jaune (secondaire) indique le nombre de publications dans les journaux français. Pour les étiquettes, chaque sigle désigne un laboratoire ou une équipe dont le directeur est précisé entre parenthèses, l'* définit un laboratoire propre. Quand j'ignore le nom exact du laboratoire en 1980, j'indique le numéro de laboratoire associé (LA).

Pour la *Chaudronnerie* : CECM (Centre d'études de chimie métallurgique, Vitry-sur-Seine), CM (équipe de chimie minérale, Marseille), ERA 679 (Strasbourg), ESM (équipe d'étude structurale des matériaux, Grenoble), LA 177 (anciennement dirigé par Michel puis Lacombe, Orsay), LMHTDS (Laboratoire des matériaux de haute température et désordres structuraux, Paris).

Pour la *Chrétienté* : CCS (équipe de cristallographie du solide, Paris), EF (équipe des fluorures, Le Mans), LA 254 (anciennement dirigé par Prigent, Rennes) LCCS (Laboratoire de cristallographie et chimie du solide, Caen), LCS (Laboratoire de chimie du solide, Bordeaux), LSBRDS (Laboratoire des structures bidimensionnelles et rôle stéréochimique des doublets solitaires, Nantes).

Pour la famille Trombe : à Meudon-Bellevue, CMTR (équipe de chimie métallurgique des terres rares), ETS (équipe des éléments de transition dans les solides), PCM (équipe de physico-chimie des matériaux), LES (Laboratoire de l'énergie solaire, Odeillo), PCML (équipe de physico-chimie des matériaux luminescents, Lyon). Pour les autres : CPSX (équipe de chimie physique du solide par diffraction très précise des rayons X, Châtenay-Malabry), CRPM (équipe de cristallographie, réactivité et protection des matériaux), GCCS (groupe de cristallographie et de chimie des solides, Clermont-Ferrand), LA 159 (anciennement dirigé par Aubry et Hérold, Nancy), LCM (Laboratoire de chimie minérale, Lyon), LCNTN (Laboratoire de céramiques nouvelles de type nitrure, Limoges), PCMS (équipe de physico-chimie des matériaux solides, Montpellier).



Par rapport à 1964, la carte indique une montée en puissance de la *Chrétienté*, emmenée par l'école *hagenmullerienne* (Bordeaux, Nantes, Le Mans) mais qui s'exprime aussi avec force à Caen et à Rennes. En raison de la rupture d'Hagenmuller avec le « père » Chrétien, il me semble important de préciser que la *Chrétienté* n'est pas une famille socialement soudée. Si au niveau épistémologique les héritiers de la *Chrétienté* défendent plutôt l'approche « élémentaire » minérale, le fils rebelle (Hagenmuller) a tendance à vouloir freiner la carrière de ses anciens condisciples – comme Deschanvres – ou de leurs épigones – comme Lucas –.¹⁷⁸ Comme un tel schisme n'a pas eu lieu en *Chaudronnerie*, les oppositions ne sont pas aussi vives. Pourtant, par rapport à sa position hégémonique, la *Chaudronnerie* a connu un déclin relatif évident : le pôle parisien est moins fort et Jeannin et Montel ont quitté Toulouse. La colonisation de Grenoble ne suffit pas à infléchir la tendance. Ses nouveaux leaders – Fayard, Collongues, Montel et Bernier – ont remplacé les anciens : Chaudron, décédé (1976), Forestier retraité ainsi que Michel (1978), Bénard (dont le Laboratoire a quitté

¹⁷⁸ « Lucas n'était pas soutenu par Hagenmuller parce qu'à partir du moment où on n'était pas sous sa coupe, qu'on n'était pas d'accord avec lui, on était contre lui. [...] Hagenmuller était déjà contre Deschanvres » [I Galy, 2006, p. 8, 28]. « *PT : Votre laboratoire en a souffert ?* – JL : Oui, quand Hagen était président de commission et avait un vrai pouvoir dans notre système » [I Lucas, 2006, p. 6].

la communauté) entré à l'Académie des sciences (1980). L'éclatement du LTR en 1977, qui jusque-là disposait d'une grande force de frappe, fait perdre une certaine visibilité à la famille Trombe mais permet une meilleure propagation de son influence. Avant 1977, Trombe avait un peu essaimé au-delà de Bellevue : à Lyon avec Françoise Gaume et à Odeillo (V.2). Le rééquilibrage et la dispersion, qui profitent indéniablement à Hagenmuller, sont rendus sensibles par l'écrasante production (quantitative) du LCS par rapport à son plus proche rival, le CECM : 93 publications contre 55 seulement ! En quinze ans, depuis le milieu des années soixante, les « Bordelais » ont déplacé le centre de gravité de Vitry-sur-Seine et la région parisienne vers Bordeaux et la province. En termes quantitatifs, la création scientifique de l'école *hagenmullerienne* parvient à imposer sa vision propre à l'ensemble de la communauté. Désormais, le laboratoire bordelais apparaît comme « le » laboratoire de la communauté nationale. En lui délivrant un label « propre » avec l'intitulé « chimie du solide », le CNRS marque une étape essentielle (1974).

On pourrait objecter que l'analyse filiale est erronée : d'abord, toutes les filiations n'apparaissent pas sur la carte¹⁷⁹ ; que les échanges sont nombreux (collaboration et mélange des docteurs) ; qu'une famille n'agit pas comme un bloc mais se nourrit de rivalités intestines ; enfin et peut-être surtout, que la filiation scientifique n'a plus de sens au moment où la matrice disciplinaire est largement acceptée vers 1980 (III.2.2). À l'apogée de sa construction d'une communauté, une analyse en terme de famille scientifique ou d'écoles de recherche perdrait sa pertinence. Les laboratoires-types développés précédemment montrent que, sous la rhétorique d'un dogme commun, les altérités locales restent vivaces. Ceci justifie le recours aux filiations, même si probablement elles sont moins marquées que trente ans plus tôt. On peut remarquer que le peuplement géographique est assez homogène sur l'ensemble de l'hexagone – à la carte proposée, il conviendrait d'ajouter Lille et Orléans, qui sont deux pôles de chimie du solide plutôt affiliés à la physique –. Il faut souligner aussi la multiplicité des filiations, la multiplication des dénominations de laboratoires (par rapport à l'homogénéité de 1964), les différences de spécialisations « élémentaires » et les divergences de pratiques – si l'on infère à partir des quatre laboratoires-types –. Un rapide décompte des publications place les « indépendants » (non directement affiliés à l'une des familles) en tête avec 219 publications, puis l'école *hagenmullerienne*, 126, précédant la *Chaudronnerie*, 102, puis le reste de la Chrétienté, qui se débrouille plutôt bien : 89. Enfin, si depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale la famille Trombe s'est souvent montrée innovante et performante, elle perd ici du terrain quantitativement au moins : 43 publications réparties en cinq laboratoires ! Suivant cette perspective, l'école *hagenmullerienne* ne représente qu'une publication sur cinq (22%) en France. Si on associe « Bordelais » et *Chrétienté* en raison de leur convergence de pensée « élémentaire », le total de publications atteint un gros tiers (37%) des publications hexagonales, largement supérieur à la *Chaudronnerie* et la famille Trombe réunies (25%). Cependant, même une large prédominance numérique ne suffit pas à expliquer la disparition (progressive et invisible) du projet œcuménique de chimie de l'état solide.

¹⁷⁹ Le gros défaut de cette cartographie est d'indiquer une filiation par le seul directeur de laboratoire, ce qui surestime son rôle et oublie les mélanges synchroniques, les influences historiques. Marc Drillon, formé à Bordeaux, va rejoindre le Laboratoire Bernier à Strasbourg. Le laboratoire de Toulouse est rangé parmi les « indépendants » alors que Montel (ancien élève de Chaudron) et Jeannin (ancien élève de Bénard) y ont développé une équipe (1965-1975), qui est restée à Toulouse lorsque eux-mêmes sont repartis à Paris. « Jusque-là [1975], le professeur Jeannin faisait des rayons X pour la chimie du solide, à Toulouse, mais il était reparti à Paris. C'était un excellent professeur qui venait du laboratoire Bénard. Il y avait une équipe qui restait mais il n'y avait plus rien sur le plan des rayons X. » [I Galy, 2006, p. 11]. À Clermont-Ferrand, marqué « indépendant » aussi, Jean-Claude Cousseins, élève de Chrétien, est professeur en 1973 ; idem à Limoges où Bernard Gaudreau, autre élève de Chrétien, est maître de conférences [Chrétien, 1973] et où arrivent Frit et Bonnet, deux « Bordelais ».

C'est que – ce sera le troisième point –, des stratégies individuelles divisent plus la *Chaudronnerie* que l'école *hagenmullerienne* : pour celle-ci, un chef charismatique et ses anciens étudiants, pour celle-là, d'anciens condisciples, plus ou moins rivaux. Il est vrai que Fayard et Collongues co-organisent en juillet 1977 un colloque international « Ordre et désordre dans les solides » [CNRS, 1978] mais un colloque de quelques jours n'a pas la force de frappe d'un laboratoire puissant. Or, en 1972-73, Collongues quitte le CECM, dirigé par Michel, pour assouvir ses ambitions personnelles, et ce faisant, fait voler en éclat le laboratoire fédérateur mis en place par Chaudron : ayant perdu les oxydes, le CECM s'oriente résolument vers les seuls métaux et perd de sa superbe tandis que Collongues ne parvient pas à imposer seul la chimie appliquée de l'état solide en créant un laboratoire – d'autant plus qu'il n'y étudie que les composés ioniques –. Ce faisant, il se prive du savoir-faire déjà ancien des métallurgistes du CECM en microscopie électronique. La microscopie électronique aurait pu lui servir au cours des années 1970 lorsqu'elle devient cruciale – sur le plan international – pour l'étude des solides non stœchiométriques (VI.2.1.2), et à laquelle le LTR puis, plus tard, les laboratoires de Caen ou Nantes ont recours.¹⁸⁰ De plus, Collongues ne semble pas favoriser l'essor de ses premières étudiantes : restées dans son ombre, elles acceptent une tutelle scientifique et se sacrifient pour lui – au niveau administratif par exemple –. Ne sont-elles pas aussi des femmes, fascinées par le charisme d'un patron séducteur ? Le rapport inégal du maître à l'élève est ici renforcé par la position défavorable des femmes en recherche universitaire. À celles qui auraient pu fonder d'autres creusets, il n'en donne pas l'occasion. Au contraire, Hagenmuller, qui a eu la chance de recruter, à l'université de Rennes, quelques étudiants remarquables – deux de ses dix premiers thésards deviendront académiciens ! –, va rapidement leur laisser une large indépendance scientifique.¹⁸¹ L'ont-ils dépassé scientifiquement lui qui n'est pas vraiment cristallographe ? A-t-il alors eu l'intelligence de le comprendre, ce qui aurait motivé sa décision ? Grâce à cette indépendance, ils vont faire fructifier le programme de recherche énoncé à Bordeaux. Les succès des élèves font le bonheur de l'école. D'autre part, Trombe et Flahaut, plus rétifs à collaborer avec les industriels que Collongues ou Hagenmuller, vont subir de plein fouet la baisse des soutiens récurrents du CNRS au cours des années 1970, qui se solde pour le premier par la liquidation d'un laboratoire propre jugé trop fondamental,¹⁸² pour le second par une désaffiliation du CNRS.

Quatrièmement, si les stratégies et les moyens diffèrent, les objectifs divergent aussi. Chacun des quatre directeurs – Flahaut, Trombe, Collongues, Hagenmuller – dispose d'un charisme indéniable auprès des étudiants, à tel point que quarante ans plus tard le charme opère encore. Mais ils ne l'utilisent pas tous de la même façon : Trombe favorise l'autonomie et le libre-arbitre, choisit de laisser faire les étudiants et se passionne lui-même pour le projet des fours solaires dans la deuxième moitié de sa carrière (V.2) ; Collongues s'épanouit plus

¹⁸⁰ Le soutien de Fayard pour Galy, outre une affinité individuelle, peut s'expliquer par une convergence de vue sur l'importance de la microscopie électronique. « Mon vrai support était Fayard – et pas Collongues – dans cette période » [I Galy, 2006, p. 16]. En effet, le CECM, dès les années 1960, a recours à cette technique pour étudier les métaux : « La microscopie électronique en transmissions apporte dans ce domaine [de la recristallisation] des renseignements d'un grand intérêt, et a été appliquée à l'examen de cuivres de différentes puretés (CECM) » [RA CNRS, 1966, p. 138]. Son emploi n'est pas neuf puisque, dès 1956, le CNRS avait acheté quinze microscopes électroniques [RA CNRS, 1957], probablement pour les physiciens et les métallurgistes.

¹⁸¹ « je crois qu'il a eu beaucoup de chance à ce moment-là car il a recruté pendant deux ou trois ans les meilleurs étudiants de la petite université de Rennes. Un an avant moi, il avait embauché Jean Rouxel qui était un élève brillant, il n'était pas allé en taube non plus pour le bonheur de Hagenmuller. » [I Lucas, 2006, p. 2] « Sur les sujets, il [Hagenmuller] nous laissait assez libres. Quelques conseils seulement, des grandes directions. Tous les sujets que j'ai menés, je les ai choisis de ma propre initiative. » [I Pouchard, 2004, p. 24].

¹⁸² « Il y a eu ce drame si l'on peut dire pour la chimie du solide, c'est la pression de l'industrie pour faire des choses "utiles". Beaucoup d'études fondamentales ont perdu de leur intérêt à cause de cela, c'est dommage. » [I Caro, 2005, p. 8].

dans les amphithéâtres et à la paillasse que dans les commissions scientifiques – même s’il y est très influent¹⁸³ – ; Flahaut, isolé à la faculté de pharmacie, essaie de gérer le grand écart avec les facultés des sciences. À la suite de Lebeau et Chaudron, ces trois mandarins poursuivent l’effort vers les hautes températures et s’attèlent à l’édition d’une *Revue des hautes températures et des réfractaires* à partir de 1964. Suivre une logique instrumentale s’avère d’autant moins fédérateur dans une Université française bâtie sur des savoirs fractionnés qu’elle se déploie à cheval sur deux disciplines rivales, ici la physique et la chimie. En 1979, quinze ans après sa création, la revue devenue internationale n’atteint qu’un modeste facteur d’impact de 0,246 ce qui la place au soixante et onzième rang des revues nationales, le cinquième (et dernier) pour les revues de chimie [CNRS, 1980]. Elle est alors largement distancée par une revue disciplinaire comme la *Revue de chimie minérale* (facteur d’impact de 0,823).¹⁸⁴

Hagenmuller aurait-il compris, à l’heure de la science internationale, que l’édition de revues nationales n’est pas efficace ? Quoiqu’il en soit, au lieu de lancer un projet d’édition long et hasardeux, il participe à une dizaine d’*editing boards* dans des revues internationales [Hagenmuller, 1998, p. 8]. On le voit et on l’entend partout, ce qui en politique comme en science fonctionne bien. Il fait travailler systématiquement les groupes bordelais pour que le laboratoire clôture l’espace d’étude : tous les solides cristallins minéraux mais eux-seuls,¹⁸⁵ espace local qui devra coïncider avec le territoire de la communauté. Il essaie aussi de bloquer ceux qui développent des techniques différentes comme la « microscopie électronique » à Caen.¹⁸⁶ Réciproquement, il favorise l’implantation de ses anciens étudiants à travers l’hexagone. Il avance ses pions et tente d’écraser le paysage national de sa stature tout en évitant un affrontement direct avec Collongues. Alors qu’il est bien soutenu par la *Chaudronnerie*, qu’il était peut-être le seul à pouvoir le faire, Collongues n’essaie pas de mettre le holà aux prétentions hégémoniques d’Hagenmuller.¹⁸⁷ Plus intéressé par son œuvre scientifique ou l’organisation d’un laboratoire harmonieux que par des luttes sociales usantes, il se replie devant le rouleau compresseur bordelais, se contente de protéger ses propres intérêts et ceux de quelques-uns de ses proches, comme Lucas ou Rouxel.¹⁸⁸ Il donne

¹⁸³ « Collongues [...] m’a toujours soutenu dans les comités, les commissions. Il est devenu mon ami, nos deux personnalités collaient bien, nous n’étions pas des bulldozers, nous n’aimions pas les chocs frontaux. Collongues était beaucoup plus fin qu’Hagenmuller. Collongues a fait la même chose avec Rouxel quand celui-ci a fait de l’ombre à Bordeaux, il l’a soutenu. » [I Lucas, 2005, p. 8].

¹⁸⁴ Par la suite, au cours des années quatre-vingt, la côte de la *Revue de chimie minérale* baisse : en 1987, son facteur d’impact atteint 0,578 et la revue ne déclare plus que 253 abonnements [CNRS, 1988]. Un tel impact la place au même niveau que le *Bulletin de la Société chimique de France*.

¹⁸⁵ La stratégie consiste d’abord à essayer de minimiser l’importance des solides qui ne sont pas étudiés par Bordeaux, voire à affaiblir les laboratoires qui les étudient. C’est le cas du graphite d’intercalation étudié à Nancy par le groupe Hérold « Ce qui est amusant c’est que le Comité national du CNRS avait décidé en 1975 [année où Hagenmuller accède à la présidence de section] de ne plus donner un centime pour l’intercalation dans le graphite. Deux membres du Laboratoire de chimie minérale appliquée sont partis sans avoir été remplacés, ce qui n’arrivait quasiment jamais à cette époque. » [I Hérold, 2007, p. 7]. Même si Hérold lui-même récuserait mon interprétation : « *PT* : Vous étiez quand même incorporés à la communauté de chimie du solide française ? –AH : Oui, tout à fait, le problème était plutôt local. » [I Hérold, 2007, p. 7]. Quand l’intimidation n’a pas suffi et que le domaine est lucratif – comme pour les verres de fluorure à Rennes –, le LCS se met sur les rangs (VII.1).

¹⁸⁶ « On était deux dans ce cas-là : il y avait Raveau aussi sur sa *black list* avec moi. » [I Lucas, 2005, p. 6]. « Hagenmuller n’a pas soutenu des masses Deschanvres, qui était le patron de Raveau. Quand je dis « pas soutenu », on comprend ce que je veux dire... » [I Galy, 2006, p. 8].

¹⁸⁷ « Hagenmuller n’a jamais cherché à mettre son poids sur Collongues, il gardait des limites raisonnables avec lui. J’appréciais beaucoup Collongues mais je trouve que c’est un peu dommage qu’il n’ait pas plus utilisé son poids pour essayer non pas de contrer Hagenmuller mais de limiter un peu l’influence. Je pense qu’au niveau national, il avait sûrement l’envergure pour pouvoir le faire. » [I Galy, 2006, p. 16].

¹⁸⁸ Hagenmuller « a vraiment choisi d’essaimer. Des écoles de chimie du solide se sont créées partout où ses élèves sont allés : J. Rouxel à Nantes, J. Lucas à Rennes, d’autres encore à Bordeaux. Il a envoyé des gens

l'impression de se disperser sur plusieurs thèmes, de choisir des sujets qui lui plaisent plutôt que ceux à la mode, où il faut être vu. Plus transversal, il n'a pas l'ambition unificatrice de son rival parce qu'il a grandi dans une science qui faisait bon ménage à trois entre métallurgie, hautes températures et chimie de l'état solide.

Enfin, la vie sociale ne se réduit pas à des luttes d'intérêt et d'influence. Le tableau qui précède aurait tendance à décrire un monde où les calculs et l'opportunisme sont les clés de l'affaire. Elles ne sont pas les seules. La chimie du solide n'aurait pu émerger sans un sentiment humain très fort, celui de communauté. Les « personnages » mentionnés se connaissent très bien, se rencontrent souvent, deviennent amis, intimes de la famille (matrimoniale).¹⁸⁹ Hagenmuller, comme il aime lui-même le rappeler, ne dédaigne pas les amitiés avec les gens de sa génération – Trombe, Prigent, Collongues – ou de la suivante – Perez y Jorba, Livage –.¹⁹⁰ Évidemment, des différences d'école ne constituent pas un frein majeur pour lier des amitiés personnelles au delà des rivalités des mandarins.¹⁹¹ Les écoles sont importantes dans la mesure où elles favorisent les contacts internes et donnent moins l'occasion de rencontres extérieures. Néanmoins, les contacts extérieurs sont nombreux : réunions de la Société chimique de France, celles des hautes températures, les colloques nationaux ou internationaux, les soutenances de thèse...

Ainsi, graduellement, pour toutes ces raisons et pour d'autres (les mandarins de la chimie de l'état solide comme Chaudron et Bénard restent fidèles à la chimie minérale), les tenants de la chimie du solide gagnent du terrain sur ceux de la chimie de l'état solide et des hautes températures. La chimie métallurgique se rapproche de la métallurgie physique. La métallurgie universitaire perd du terrain par rapport à la chimie du solide (III.4.3.2).¹⁹² Les propriétés physiques des métaux « purs » vers lesquels se sont engagés Chaudron et, dans une moindre mesure, Trombe se révèlent techniquement décevantes (V.1) : le « paradigme » de la

ailleurs pour faire école. [... Collongues] au contraire n'a pas beaucoup essayé : les gens ont eu plutôt tendance à rester sur place et à évoluer en restant près de lui, près du *père*. [...] Si l'on veut comparer les deux laboratoires, je dirais qu'à Bordeaux, ils avaient plus de moyens : ils étaient plus riches, le laboratoire était plus gros. R. Collongues nous paraissait « supérieur » du point de vue scientifique et humain. Chez P. Hagenmuller, il n'y avait pas de filles. Donc, nous étions très contentes d'être avec Collongues. Il existait une rivalité constructive entre les deux laboratoires. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 1, 14].

¹⁸⁹ « JF : On connaissait bien Rouxel. – PT : *Comment vous rencontrez vos homologues de la chimie du solide ? au moment des thèses, des colloques ?* – JF : Oui bien sûr. On se connaît très bien. Avec Hagen, on se tutoie. C'est un grand bonhomme » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 6] « Je suis un grand admirateur de Collongues : il avait une intelligence qui dépassait largement le domaine de la chimie, c'était un philosophe, un peu à la manière de Camus. Il était aussi mon meilleur ami. » [I Lucas, 2006, p. 1].

¹⁹⁰ « J'aimais beaucoup Collongues parce qu'il me disait quand il n'était pas d'accord avec moi. [...] J'ai très bien connu Monique Perez y Jorba qui a fait du bon travail sur la décomposition des verres par la pollution des voitures. [...] mon ami Jacques Prigent. J'avais aidé Prigent à terminer sa thèse quand je suis arrivé à Rennes, en 1956. [...] J'étais copain de Trombe. [...] Jacques Livage et moi, nous sommes très amis. » [I Hagenmuller, 2005, p. 5, 9]

¹⁹¹ « absolument, on s'entendait bien. [...] Avec Jacques, on était des opposants, non ce n'est pas vraiment ça... [...] Je connaissais très bien Andrée Harari de son [Collongues] groupe qui s'est mariée avec Olivier Kahn, deux collègues amis. [...] J'appréciais beaucoup Collongues [...] Avec Raveau, on s'était *avoiné* une fois lors d'une réunion de la Société chimique. Habitué à la Suède et l'Allemagne, après la conférence, je pose des questions brutales, je n'étais pas du tout d'accord. Les gens ont pensé qu'on était ennemi parce que Hagenmuller était déjà contre Deschanvres, ils pensaient que j'étais téléguidé pour attaquer Raveau, l'élève de Deschanvres, lui-même élève de Chrétien. Heureusement qu'avec Bernard, il y a longtemps qu'on est passé au-dessus de ce genre de conneries. » [I Galy, 2006, p. 9, 16, 27]

¹⁹² Un premier indice du déclin de la cristallographie : au cours du 3^e Plan, on assiste à un petit réajustement : la « création d'un centre d'Etudes Cristallographiques à Nancy [est réalisée] en substitution de l'extension prévue du CECM de Vitry. » [RA CNRS, 1957, p. 19]. Deuxième indice plus fort sans doute : depuis 1975 – création de la section rassemblant les chimistes du solide et les métallurgistes – et jusqu'en 2007, seuls deux métallurgistes ont présidé la section : Fayard (1979-1982) et Annick Percheron-Guégan (1991-1994).

pureté s'effondre devant la montée des composés complexes, multi-élémentaires, nommés « *dirty materials* » par provocation. Les innovations techniques : diffraction des rayons X, cristallogénèse (1960-1970), microscopie électronique (après 1969) associées à des sujets brûlants : non stœchiométrie (1956-1975), transitions ordre-désordre (à partir des années 1950) ou métal-isolant (à partir des années 1970) ponctuent l'avènement progressif d'une chimie du solide de plus en plus mathématique. Les caractérisations (1965-1985) puis la modélisation (après 1980) poussent d'autant plus vers la mathématisation que l'informatique commence à changer le visage de la chimie (VI.2.2). Chacune de ces étapes techniques est essentielle au processus historique mais aucune ne suffit à rendre compte de l'émergence de la chimie du solide plutôt que la consolidation de la chimie de l'état solide, ou de l'affaiblissement de la chimie métallurgique.¹⁹³

Si, a posteriori, tel acteur voit dans telle étape un élément-clé de l'histoire de la chimie du solide, c'est parce que cette étape, cristallisée par la mémoire, a été intimement vécue au cours de sa propre carrière. Tel insiste sur la « microscopie électronique », mais tel autre ne mentionne même pas cette technique de caractérisation et tient au contraire à souligner combien la cristallogénèse a rapproché les chimistes des physiciens, un troisième oublie l'originalité chimique pour se focaliser sur la dimension mathématique... Aucune étape scientifique ne fait consensus comme pierre angulaire de la chimie du solide. D'ailleurs, si seuls les critères scientifiques suffisaient, la chimie de l'état solide, qui présentait une dimension épistémologique plus vaste, aurait résisté à la chimie du solide pour fédérer métallurgie, cristallographie, hautes températures et chimie, voire plus vaste encore. Tel n'est pas le cas en 1980. Pourquoi ? Parce que les luttes institutionnelles, les stratégies hexagonales, les productions scientifiques, l'influence internationale ont construit une nouvelle identité, forgée et acceptée collectivement, elles ont clôturé un territoire « élémentaire » – le solide minéral – pour former une communauté de taille probablement adéquate pour la France.

L'interprétation en terme d'écoles de recherche, de familles scientifiques est sans aucun doute trop facile mais sa simplicité constitue aussi un avantage pour saisir le mouvement historique. Elle surestime clairement le rôle d'un seul individu, hors du commun, mais ne présuppose pas sa supériorité scientifique – qu'aucun témoignage n'a d'ailleurs suggéré –. Elle ne peut décrire l'activité individuelle de tous ceux qui ont trouvé un intérêt à défendre et à porter la chimie du solide – et probablement ils ont été nombreux – mais insiste sur la dynamique collective, qui a rendu le changement possible. Cette émergence, qui profite plus à quelques-uns, est le fait de tous comme le dit Braudel à propos du capitalisme : « Privilège du petit nombre, le capitalisme est impensable sans la complicité active de la société ». La focalisation sur la communauté nationale oublie trop le contexte international. Elle ignore l'influence des voisins à travers les frontières extérieures mais propose une recomposition des frontières intérieures. En d'autres termes, elle défend l'idée que la construction identitaire permet l'intégration des altérités en un tout cohérent mais non homogène : la discipline scientifique.

¹⁹³ Le fleuron de la chimie métallurgique au CNRS – le CECM – a fêté le vendredi 26 janvier 2007 sa disparition puisqu'il va déménager – vente du terrain et des bâtiments – pour rejoindre, de l'autre côté de la rue, l'« enclos » des laboratoires de Thiais et devenir une unité mixte. À cette occasion – qui réunissait les « anciens » du CECM et les membres en place –, Michel Cornet a prononcé (et rédigé) un texte intéressant (informations amicales d'Hélène Mondange).

3°) Émergence d'une communauté : rompre l'équilibre des altérités locales pour créer une identité globale

La chimie du solide émerge à la conjonction d'une communauté et d'une matrice disciplinaire (chapitre III). Au niveau institutionnel, les signes se multiplient à partir du milieu des années soixante : changement de nom des laboratoires (1966-1975), réorganisation au CNRS de la section chimie minérale en « chimie des matériaux solides » (1975), création d'un laboratoire propre (1974), entrée des premiers « correspondants » à l'Académie (1978). Les évolutions institutionnelles ont lieu par à-coups. Si les méthodes (III.2) et les institutions (III.4) changent de visage, c'est que des individus poussent à leur mutation. Une identité communautaire se met progressivement en place : connivence sociale, similitudes scientifiques et convergence historique. Le récit légendaire (III.1) en est la meilleure illustration.

Pour chaque individu de la communauté, le temps n'est pas discontinu et glisse selon un rythme plus lent, plus continu. Chaque jour n'est pas très différent de la veille ni du lendemain. Au choc de l'édit institutionnel répond le pas alangui du quotidien, pleinement vécu entre chaque seconde. La lenteur n'exclut pas le mouvement mais le rend moins repérable. Dans chaque tête, les frontières bougent, à cadences inégales, pas à pas. Les nouveaux goûts identitaires affadissent les anciens : on se trouve moins minéraliste ce matin, on laisse tomber la chimie de l'état solide après une longue rêverie, on quitte le groupe des hautes températures comme on change d'amis, lentement. En d'autres termes, la mise en place d'une nouvelle identité communautaire n'a pas les mêmes effets sur chaque individu. Chacun l'assimile au travers de ses yeux propres, l'apprécie d'une position unique (psychologique). Certains revendiquent leur appartenance à la communauté et se définissent comme chimistes du solide.¹⁹⁴ D'autres se disent cristallochimistes et définissent la cristallographie comme une « cristallographie appliquée ». La structure n'y est pas cruciale en tant que telle mais parce qu'elle permet de renouveler la synthèse chimique. Ils considèrent la cristallographie comme la base de la chimie du solide.¹⁹⁵ L'une intègre l'avènement de la chimie du solide, la regarde s'épanouir chez ses voisins mais préfère se tenir à l'écart, indépendante, pour conserver sa propre identité de physico-chimiste.¹⁹⁶ L'autre rejette la notion même de communauté, les étiquettes simplificatrices et pense que l'intérêt n'est pas commun, mais avant tout individuel.¹⁹⁷

¹⁹⁴ « PT : Vous étiez vraiment dans la communauté de la chimie du solide française ? – JF : Incontestablement. » [I Flahaut & Rivet, 2004, p. 10] « PT : Comment vous définissez-vous alors ? – GO : Je suis chimiste du solide. Je suis sans complexe » [I Ouvrard, 2006, p. 3].

¹⁹⁵ « Je suis un cristallochimiste mais je suis quand même un chimiste du solide, j'ai fait beaucoup de synthèses, aujourd'hui j'en fais plein. C'est la base : d'abord il faut des composés originaux. » [I Galy, 2006, p. 3]. « BBV : Vous avez dit que vous sentiez cristallochimiste, qu'est-ce que vous entendez exactement par là ? – AK : Je n'ai jamais fait de la cristallographie pour elle-même [mais] de la cristallographie appliquée, parce qu'on en avait besoin pour aller plus loin dans le domaine des propriétés. C'est tout à fait lié à l'élaboration des matériaux » [I Kahn-Harari, 2004, p. 15]

¹⁹⁶ « Je fais de la chimie physique [...] Quand je suis arrivée ici, j'étais déjà âgée, j'avais ma méthode. C'est peut-être prétentieux mais je ne suis pas influençable, je suis ma vision (rire). Caro laissait libre vraiment. [...] PT : Comment définiriez-vous la chimie du solide ? – EA : Tout ce qui va de la préparation, aux caractérisations et aux applications. C'est ce que ce laboratoire-ci fait et que Caro ne faisait pas pour les applications parce que c'était trop fondamental. » [I Antic, 2006, p. 2, 8].

¹⁹⁷ « PT : Comment est-ce que vous vous définiriez ? Quel type de chimiste ? – AM : ... Je ne suis pas trop partisan des étiquettes. [...] Je me considère comme chimiste organicien qui m'intéresse à des problèmes reliés aux solides conducteurs. [...] La communauté, je ne sais pas. Est-ce qu'il y a une communauté ? Je dirai plutôt non. » [I Moradpour, 2006, p. 14]

Au delà de réflexes idiosyncrasiques, altérités irréductibles des êtres humains les uns aux autres, il y a plus. Quelle que soit la psychologie personnelle, le point de vue de chacun dépend de ses positions dans la communauté : géographique (fixe dans une école ou en mouvement transversal), sociale (dominant/dominé, homme/femme, chercheur/enseignant, chercheur/technicien), temporelle (âge, expériences passées), épistémologique (composés étudiés, instruments utilisés). Non seulement chaque individu intervient sur le champ suivant son « capital scientifique » et social [Bourdieu, 2001, p. 110-141] mais encore il voit et raconte l'histoire du champ suivant les positions multiples qu'il occupe ou a occupé –.¹⁹⁸ C'est cette distorsion du regard – et donc de l'entendement – que j'entendais souligner en parlant d'un *témoignage localement déformé*. Non pas qu'il existe un point de vue omniscient qui ne serait pas déformé mais pour préciser que chaque témoignage est localement situé (même dans le cas où la trajectoire de l'individu a été transversale).¹⁹⁹ L'aspect relatif de chaque témoignage et de chaque source historiographique est un point crucial pour l'historien, qui doit en outre être conscient de la déformation que lui-même opère à la lecture du champ (présupposés qui influencent son écoute, la direction des entretiens et le choix des critères pertinents). Ces inévitables relativités justifient, selon moi, la nécessité de récits multiples, d'hypothèses alternatives, de questions ouvertes, non pas toujours pour être comblés un jour mais pour rendre compte de multiples histoires qui adviennent en parallèle. De plus, avoir conscience que l'angle de vue est relatif permet d'intégrer si possible cet aspect à la lecture des témoignages suivant le rapport – simple mais efficace – dominant/dominé : mandarin ou chercheur, chercheur ou technicien, homme ou femme... Ne devrait-on pas d'ailleurs parler d'histoires plutôt que d'Histoire ? De champs scientifiques plutôt que du champ ? De chimies du solide plutôt que de la chimie du solide ?

Relativiser à l'aune de chaque point de vue interroge l'identité communautaire. Certes celle-ci a été vécue dans l'action par les acteurs comme un moteur de l'émergence de la chimie du solide. Pour l'historien, qui vient après l'action, la problématique est différente. L'identité devient un concept pratique, qui permet d'étiqueter simplement, mais il faut prendre garde à ne pas la réifier. Où se situe sa matérialité ? En un sens, nulle part ailleurs qu'en ceux qui y croient. L'identité a souvent servi la démesure idéologique. L'identité communautaire peut ici être assimilée à une ferveur mystique. Elle dépend évidemment d'éléments matériels mais ceux-ci ne suffisent jamais à la déterminer complètement. Comme par un tour de passe-passe, l'image identitaire, que l'on croyait stable, disparaît si l'on fait varier la distance focale d'observation. L'entité homogène que l'on croit avoir saisi à chaque

¹⁹⁸ Pour revenir à ce qui a été abordé à la fin du paragraphe 2 de la conclusion. Il est symptomatique que trois interviewés seulement considèrent la microscopie électronique comme un tournant majeur (au même titre que la cristallinogenèse pour les étudiants de Collongues) en chimie du solide. Or, ils sont tous les trois très impliqués dans sa manipulation. « PC : Pour moi, si je ne devais retenir que deux éléments : je dirais l'instrumentation avec la microscopie électronique à haute résolution et l'application de tout un appareil mathématique nouveau à la chimie. Pour moi, les instruments ne sont pas des presses-boutons mais savoir comment le signal est obtenu est extrêmement riche de sens. » [I Caro, 2005, p. 14] « Pour moi et nombre de scientifiques, c'est lui [Wadsley] qui a vraiment fait le début de la chimie du solide avec les *microscopistes* à la fin des années soixante, avec la grande école de microscopie qu'il y avait à l'époque en Australie. C'est lui qui a véritablement lancé cette vision du solide parce qu'il a combiné ce que l'on déterminait en rayons X, ce qui est global sur le monocristal, avec les détails qu'amène la microscopie électronique. » [I Galy, 2006, p. 4]. « Le temps passant, d'autres moyens d'investigation ont donc franchi la porte de ces laboratoires, en particulier la microscopie électronique qui a effectivement montré qu'il existait d'autres types de construction de la matière, autres que ceux imbriquant deux phases atome par atome pour en former une troisième. » [I Dexpert, 2006, p. 2].

¹⁹⁹ On pourrait regretter l'emploi de l'adverbe « localement » parce qu'il fait trop référence à l'aspect géographique. Tout d'abord n'en est-il pas de même du nom « position » ? Mais c'est surtout parce que c'est en m'apercevant des conceptions très différentes de l'histoire d'un laboratoire à l'autre que j'ai pris conscience de cette idée de déformation de l'espace historique.

grossissement – sciences physiques (I.3), chimie (II.1), chimie du solide (III.4), laboratoires (IV.1-4) – se désagrège au grossissement ultérieur. Elle révèle à la place de l'identité du niveau « n » de multiples altérités aux niveaux « n – 1 ». Dans cette descente de la société au cerveau individuel, l'identité n'en finit pas de disparaître au contact de nouvelles altérités sous-jacentes. L'émergence de la chimie du solide correspond ainsi au rassemblement graduel d'individus de plus en plus convaincus et de plus en plus nombreux à défendre l'identité communautaire. Ce chemin constructif est exactement inverse à la déconstruction opérée entre le chapitre premier et le quatrième. Il ressemble à une aliénation partielle et progressive d'identités (individuelles) antérieures vers une identité (collective) inédite. Chaque individu accepte de devenir autre en abandonnant une part de ses identités passées pour revêtir – et créer de manière concomitante – la nouvelle identité. Corrélativement, par somme d'abandons individuels partiels, le groupe qui portait l'identité antérieure perd sa pertinence, ce qui justifie finalement a posteriori l'abandon initial. Tout à fait comme le cours de la bourse : le krach – disparition de la chimie minérale – suivi ou devancé par une période de prospérité – la création de la chimie du solide –.

Par exemple, considérer l'année 1964, ostensible borne du congrès de Bordeaux, comme fondatrice de la chimie du solide n'est pas convaincante si l'on regarde transversalement tout ce qui s'y passe en lien avec les solides et les chimistes. Cette année-là, le rapport de conjoncture du CNRS place sur le même plan des « efforts à continuer » : « chimie des hautes températures », « chimie du solide » et « chimie métallurgique » au sein de la chimie minérale.²⁰⁰ La *Revue des hautes températures et des réfractaires* en *Chaudronnerie* et la *Revue de chimie minérale* en *Chrétienté* sont lancées à quelques mois d'intervalle. Les chimistes étudiant les solides officient dans plusieurs RCP. Dans le monde occidental, *Progress in solid state chemistry* est édité ; le quatrième congrès international des terres rares a lieu ainsi que le cinquième congrès de « *Reactivity of solids* ».

Les aspects matériels sous-déterminent l'avènement disciplinaire. Les documents institutionnels – et par conséquent l'histoire institutionnelle – surestiment l'importance de quelques « personnages » et des structures institutionnelles.²⁰¹ Dans une certaine mesure, une campagne d'interviews diversifiées évite cet écueil. En effet, elle permet de relativiser le point de vue de chaque « source » (orale ou écrite). Ainsi, le processus historique est envisagé comme la transition d'anciennes croyances intersubjectives qui, en se recomposant, créent une évidence collective inédite, c'est-à-dire une nouvelle croyance intersubjective que rien ne prédisposait, mais qui, une fois imposée, est acceptée comme la seule qui pouvait advenir vers le « progrès ». Tout en replaçant chaque individu au cœur du processus d'évolution, cette approche insiste sur la dimension collective des échanges, qui conduisent des altérités individuelles (elles-mêmes incluses dans des identités collectives) à se créer une identité communautaire inédite, à laquelle ils adhèrent plus ou moins (suivant leurs identités passées).²⁰² N'est-ce pas la seule façon de concilier les multiples témoignages, récits de mémoire ou confessions de bonne foi au récit historique ? Par conséquent, au delà des apparences, il apparaît quelque peu utopique de parler de fondateurs de la chimie du solide, à

²⁰⁰ Ces trois entités regroupent les activités suivantes : « fours à plasma, métaux et alliages réfractaires, hautes températures et pressions élevées, propriétés électriques et magnétiques des solides, terres rares, corrosion » [RC CNRS, 1964, section 12 chimie minérale].

²⁰¹ La critique est d'autant plus justifiée que j'ai eu du mal moi-même à sortir de cette histoire institutionnelle. Guidé de proche en proche dans le choix des témoins, j'ai plus largement interviewé des (ex)directeurs, (ex)chefs de groupes... que des chercheurs transversaux, des techniciens, des secrétaires, etc.

²⁰² Un tel jugement met en évidence le problème de l'histoire à rebours : en partant de l'identité postérieure – la chimie du solide en 1980 –, il est difficile de suivre le processus qui a conduit à elle parce que sa « base » est floue, aux identités multiples. Au fond, on peut même se demander si l'idée de « base » a un sens historique, autre que celui que je lui donne en 2007.

moins que l'on ne désigne par là un vague émoi parcourant la foule au passage d'une lente rumeur contagieuse.

Si le chapitre IV s'est efforcé de déconstruire l'identité collective que s'était attaché à décrire le chapitre III, c'est pour mettre en évidence la superposition des strates imbriquant identités et altérités : cristalochimiste ou physico-chimiste (au sein d'un même laboratoire), écoles parisiennes ou bordelaise (entre deux laboratoires), solidiste ou organicien (entre deux sous-disciplines), chimiste ou physicien (entre deux disciplines). Entre 1950 et 1980, se construit une identité communautaire forte autour de la chimie du solide. Ce n'est pas telle ou telle étape qui fonde une communauté mais une croyance collective qui subsume des altérités locales (IV.1-4), familiales (III.2.1) ou individuelles (II.1) sous une légitimité sociale (III.3, III.4) défendant des valeurs (III.2.2) et une histoire (III.1) communes. Au rôle moteur d'une croyance collective, on substitue bientôt une construction rationnelle de la nature ; à un processus historique contingent, un récit légendaire de légitimation et à une auto-organisation volontaire, une naturalisation disciplinaire. Et durant trois décennies, la « communauté » de chimie du solide devient l'acteur principal du drame.

Chapitre V.

Itinéraire transversal en haute température :
les fours solaires d'Odeillo

Chapitre V. Itinéraire transversal en haute température : les fours solaires d'Odeillo 309

<i>Introduction</i>	311
<i>V.1. La chimie des hautes températures face à l'état solide (1950-1970)</i>	312
V.1.1. Un régime transversal de production des savoirs (1950-1966).....	312
V.1.1.1. Un groupe diversifié en échange permanent.....	312
V.1.1.2. Un territoire métissé, ouvert aux autres et structurant.....	315
V.1.1.3. Les hautes températures comme mode de production transversal.....	318
V.1.2. Les hautes températures, de l'indépendance à la dissolution d'une communauté (1960-1970).....	322
V.1.2.1. Convergences des hautes températures et de la chimie de l'état solide vers 1960.....	322
V.1.2.2. Divergence des hautes températures vers la « pureté ».....	324
V.1.2.3. De la dissolution des hautes températures en chimie du solide (1964-1968).....	326
<i>V.2. Trajectoire des fours solaires d'Odeillo : une aventure scientifique originale et stratégique</i>	328
V.2.1. Le groupe d'Odeillo-Montlouis : l'énergie solaire entre recherche fondamentale, applications civiles et militaires (1950-1972).....	329
V.2.1.1. L'euphorie des années cinquante à Montlouis : réfractaires, enjeux militaires et coloniaux.....	329
V.2.1.2. Le projet pharaonique des années soixante : le four solaire à 1000kW.....	334
V.2.1.3. L'année 1971-1972 : l'heure d'un premier bilan pour le Groupe des laboratoires d'Odeillo.....	337
V.2.2. De la chimie des hautes températures aux sciences pour l'ingénieur.....	343
V.2.2.1. Nouvelle donne énergétique et politique scientifique (1973-1982).....	343
V.2.2.2. Crises globales, conséquences locales : réorganisation et migration d'Odeillo.....	346
<i>Conclusion</i>	350

Introduction

« La chimie des hautes températures n'existe plus comme science indépendante. » C'est en ces termes que Jean Flahaut résume un demi siècle d'histoire de chimie des hautes températures. Ce pharmacien, passé à la chimie, a commencé sa carrière universitaire au Laboratoire de chimie minérale dirigé par Lebeau à la fin des années 1940 (IV.1). Fidèle à l'enseignement de ses maîtres – Moissan, Lebeau, Picon – (II.3), il a développé les hautes températures pour étudier les solides. À la retraite de Lebeau, il a pris la place de secrétaire de la Commission de chimie des hautes températures du CNRS. Ainsi, il a ainsi participé à l'animation de la communauté des hautes températures en France et a vécu son évolution pendant près de quarante ans.

Ce chapitre raconte l'évolution de la chimie des hautes températures durant l'émergence de la chimie du solide en France. Après-guerre, la chimie des hautes températures constitue, au même titre que la chimie de l'état solide, un sous-domaine de la chimie minérale. La Commission de chimie des hautes températures du CNRS fédère alors une communauté puissante et structurée. Au cours des années 1960, la chimie du solide se construit sur la maîtrise des hautes températures pour la synthèse de solides polycristallins et la cristallogénèse (chapitre IV). La chimie du solide s'approprie alors les hautes températures (1960-1975) au point que la communauté de chimie des hautes températures se dilue dans la discipline émergente. Le succès de la chimie du solide la rend moins cruciale. Alors que les hautes températures s'imposent comme l'une des ressources majeures de la chimie du solide, pourquoi la communauté des hautes températures disparaît-elle en tant que telle ?

Je retracerai cette évolution à deux niveaux. Au niveau communautaire d'abord, un groupe autrefois structuré essaie de se réorganiser mais perd progressivement ses atouts et son intérêt (V.1). Son déclin entre 1950 et 1980 coïncide avec l'émergence de la chimie du solide. Un mouvement d'immigration en provenance des hautes températures vient renforcer la chimie du solide tandis que le mouvement d'émigration vide la communauté des hautes températures. Affaiblie par le départ de ses forces vives, la chimie des hautes températures va se restructurer et se tourner vers d'autres partenaires pour ne pas disparaître. Je n'analyserai pas la réorganisation du territoire des hautes températures en détails, mais j'en suivrai l'évolution à travers le cas d'un laboratoire atypique : les fours solaires d'Odeillo. Ce laboratoire du CNRS fondé par Félix Trombe emprunte une trajectoire très particulière : du cœur de la chimie de l'état solide durant les années cinquante, il glisse vers la périphérie de la chimie du solide à la fin des années soixante-dix (V.2).

V.1. La chimie des hautes températures face à l'état solide (1950-1970)

En France, durant les années 1950, la chimie de l'état solide reposait pour une large part sur la chimie des hautes températures (II.4). À cette imbrication sociale, une raison cognitive : le solide étant le plus inerte des états de la matière, les hautes températures constituaient un bon moyen pour accroître son activité. D'où deux conséquences pour les chimistes de l'époque. Premièrement, pour être très schématique, la plupart des synthèses cristallines se déroulaient suivant la séquence ternaire suivante : mélange mécanique de deux poudres, puis chauffage thermique pour atteindre les températures de fusion et de réaction, enfin cristallisation lors du refroidissement. Ainsi le recours aux hautes températures permettait la synthèse du composé le plus stable thermodynamiquement (chapitre IV). Deuxièmement, la chimie de l'état solide reposait sur la réactivité des solides. Mais vu leur inertie réactionnelle, il fallait atteindre de hautes températures pour observer des phénomènes réactionnels. Les hautes températures permettaient ainsi de résoudre deux problèmes chimiques cruciaux : la synthèse et l'étude de la réactivité. Par hautes températures, les chimistes et les métallurgistes entendaient une plage comprise entre plusieurs centaines et deux milliers de degrés Celsius.

Autour de 1950, le rouage principal structurant la communauté de chimie des hautes températures est la Commission de chimie des hautes températures et des réfractaires du CNRS (II.3). On y retrouve les trois principales familles de chimistes de l'état solide : *Chaudronnerie*, familles Trombe et Lebeau. C'est cet espace institutionnel que je vais analyser d'abord. L'objectif est double : donner une image de la communauté des hautes températures mais aussi réfléchir à la nature de cette commission en terme de régime de production des savoirs (V.1.1). Dans un deuxième temps, je chercherai à montrer les articulations des hautes températures avec la chimie du solide (V.1.2).

V.1.1. Un régime transversal de production des savoirs (1950-1966).

V.1.1.1. Un groupe diversifié en échange permanent

Après avoir rédigé et édité un ouvrage général sur les techniques de haute température appliquées à la chimie [Lebeau, 1950], la Commission fédère son action et se structure au niveau national. Elle réunit ses membres deux fois par an. Ces « séances » de travail en interne se tiennent en salle des Actes de la faculté de pharmacie de Paris et répondent à deux objectifs : premièrement, débattre des problèmes courants de la Commission ; deuxièmement, permettre des échanges scientifiques entre les membres. Entre trois et six intervenants exposent leur travail devant leurs collègues, chaque exposé étant suivi de vives discussions. Au début des années 1950, Paul Lebeau, devenu patriarche de la communauté, dirige toujours la Commission et règne en maître sur les journées d'études. Il incite ses propres collaborateurs et les chercheurs du laboratoire Picon à s'y exprimer. En 1956, après trente-cinq ans de règne sur la chimie des hautes températures française, Lebeau se retire de la présidence de la commission pour « des raisons de santé », à l'âge de 88 ans ! Georges Chaudron lui succède, Trombe passe de secrétaire à vice-président et l'élève de l'élève de Lebeau, Flahaut, devient secrétaire. Les séances de travail de la Commission sont de plus en plus populaires : deux

douzaines de personnes y assistent fin 1956, une quarantaine quatre ans plus tard.¹ Si l'identité des auditeurs n'est pas spécifiée, en revanche les rapports d'activité du CNRS indiquent le nom des orateurs et le titre de leur communication. Or, si la Commission s'organise effectivement comme le stipulent les rapports, les mêmes personnes – les membres de la Commission – parlent à certaines séances et écoutent à d'autres. Je postule qu'une analyse du groupe des orateurs suffit à donner une idée fiable de la Commission et par la suite, j'assimilerai les deux groupes.² Qui sont donc les orateurs qui montent à la tribune de la salle des Actes ? Et de quoi peuvent-ils donc parler de manière si passionnée ?

Une étude statistique des rapports d'activité du CNRS entre 1956 et 1963 permet de proposer une réponse.³ Par rapport à 1950, les principales familles restent les trois mêmes : *Chaudronnerie* (qui fait suite à la famille Le Chatelier), familles Lebeau et Trombe. La *Chaudronnerie* a poursuivi son ascension (28,6% des auteurs ; 32,1% des communications) au détriment de la famille Lebeau en déclin (18,4% ; 14,3%) tandis que la famille Trombe reste présente mais demeure moins puissante que les deux autres (6,1% ; 8,9%). En *Chaudronnerie*, Robert Collongues et ses étudiants sont les plus nombreux et les plus productifs (72% des communications de la *Chaudronnerie*) tandis que Flahaut et ses étudiants assurent une part majeure pour la famille Lebeau (57,1% des communications de la famille).⁴ Ces trois familles « historiques » – déjà présentes en 1950 – représentent plus de la moitié de la communauté (53,1%, 55,4%). À ces trois dynasties de minéralistes, il faut ajouter trois autres contributions notables : Étienne Bonnier du Laboratoire de métallurgie et électrochimie de Grenoble (4,1% ; 7,1%), F. Cabannes et son étudiante Anne-Marie Anthony du Laboratoire des échanges thermiques à Bellevue (4,1% ; 5,4%), S. Teichner et ses étudiants de l'Institut de recherche sur la catalyse (IRC) à Villeurbanne (6,1% ; 5,4%). Ces six écoles universitaires assurent plus de sept communications sur dix lors des séances. Elles sont associées à la chimie minérale, la chimie métallurgique, les thermodynamiques physique et chimique. Les autres intervenants sont soit des universitaires – quelques-uns seulement comme Henri Guérin (Nancy), Jean Besson (Grenoble) –, soit des industriels venant de Saint-Gobain, de la société Le Carbone Lorraine, du CEA, de l'IRSID...⁵ La Commission reste fidèle à une volonté de

¹ « 27 membres [...] assistaient » à la première séance du 13 décembre 1956 en « salle des Actes de la Faculté de Pharmacie » de Paris. Ils étaient 23 pour la séance du 14 mars 1957 [RA CNRS, 1957, p. 97]. « Trente-sept personnes assistaient à la première réunion [le 30 novembre 1960], et quarante-cinq à la seconde [le 10 mai 1961]. » [RA CNRS, 1961, p. 259-260].

² Un décompte du nombre total d'auteurs sur la période (1956-1963) donne 49 personnes, qui assistent aussi potentiellement aux séances. Trouver le même ordre de grandeur – au maximum le double, au minimum le même – pour le nombre total d'auteurs et le nombre de spectateurs à chaque séance suggère que le groupe des auteurs et celui des spectateurs se recouvrent grosso modo, ce que stipulent les rapports. Il n'est donc pas absurde de définir la communauté des membres de la Commission à partir des seuls auteurs.

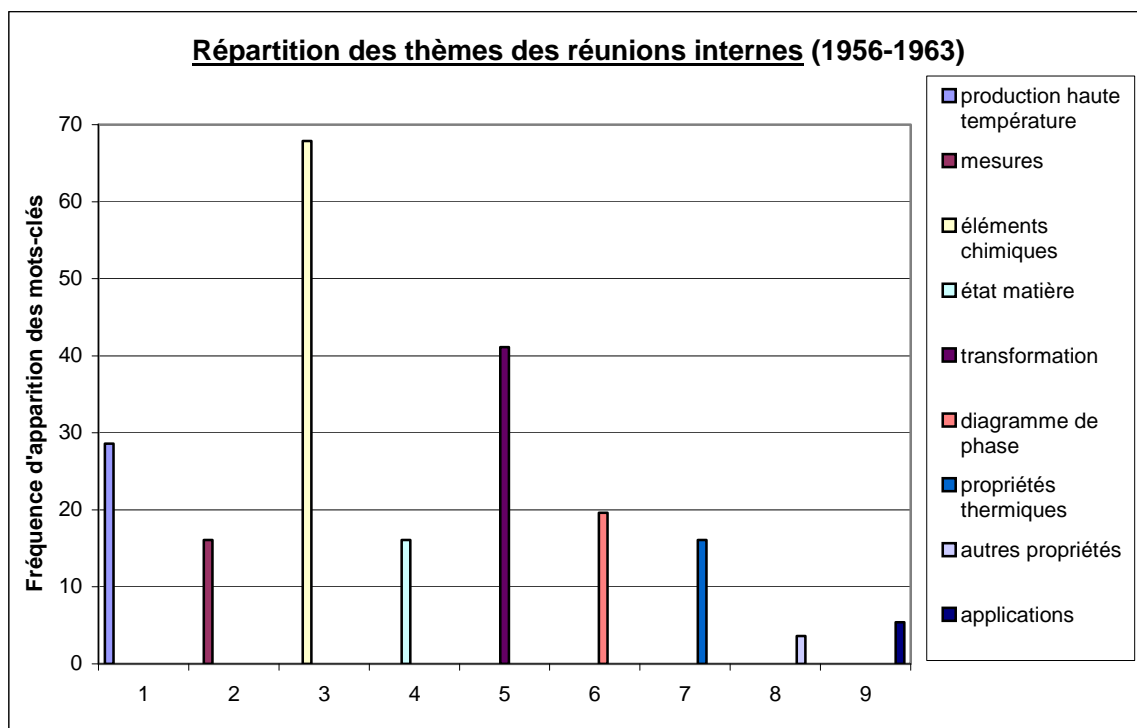
³ Ce choix est conditionné par les sources disponibles : avant 1956, les rapports généraux du CNRS ne mentionnent pas les « séances » de la Commission ; à partir de 1964, la Commission cesse cette activité-là. D'autre part, au niveau méthodologique, la périodisation est satisfaisante puisque la période de six ans est suffisamment longue pour repérer un nombre suffisant de membres (49 auteurs et 56 communications) ; elle est aussi suffisamment courte pour espérer dessiner une communauté instantanée, autour de 1960. L'ensemble des communications est répertoriée en annexe A.V.1.

⁴ La faible participation de Jacques Bénard (il communique une seule fois) et l'absence d'André Michel, deux éléments incontournables de la chimie de l'état solide en *Chaudronnerie*, appellent de nombreuses questions. Relativisent-elles l'ancrage de la chimie de l'état solide des années 1950 en chimie des hautes températures ? Indiquent-elles pour Bénard un début de migration vers les surfaces, pour Michel une impossibilité physique de venir à Paris de Lille ? Bénard et Michel gardent-ils une oreille attentive aux séances tout en n'y communiquant pas ?

⁵ Détailler plus la composition des industriels n'est pas évidente parce que les entreprises d'origine des orateurs ne sont pas mentionnées explicitement lors du compte rendu des exposés.

métissage avec universitaires et industriels, physiciens et chimistes même si la majorité des participants sont minéralistes.

À quels thèmes de recherche correspond cette répartition éclectique ? Une analyse par mots-clés du titre des 56 exposés présentés entre 1956 et 1963 indique la répartition suivante :



Près de sept titres sur dix font référence à au moins un élément chimique dans le composé étudié – par exemple « zircone-oxyde de terres rares » ou de manière moins détaillée « sulfures » – et plus de quatre titres sur dix mentionnent soit la synthèse d’un composé, soit son changement de phases. L’emploi prédominant de ces deux mots-clés (« élément chimique » et « transformation ») indique deux préoccupations de chimistes : composition et réactivité de la matière.⁶ Nommer le composé étudié revient donc d’abord à se référer à l’analyse élémentaire, c’est-à-dire au tableau périodique des éléments. Ce sont principalement les composés ioniques (oxydes, sulfures) qui sont étudiés mais aussi des métaux, alliages métalliques et le carbone. Cette référence « élémentaire » est bien plus importante par exemple que la structure de la matière – « amorphe » ou « plasma » – que l’on trouve dans 16% des titres seulement. La question structurale pourtant n’est pas négligée puisque 20% des titres parlent d’un « diagramme de phases », qui fait le lien entre la structure et la composition d’un corps, à une température et une pression données. Quand les propriétés d’un composé sont évoquées, ce sont plutôt les « propriétés thermiques » – essentiellement « réfractaires » –. Seul un titre précise explicitement que l’exposé étudie la « conductibilité électrique » (Anthony, le 12 juin 1963) tandis qu’un autre parle de « quelques propriétés » (Foëx, 14 juin 1960) sans préciser lesquelles. Les applications sont rarement évoquées directement dans les titres, mais on peut noter l’emploi de l’expression « matériaux réfractaires » probablement par une scientifique de l’industrie (Mme Lapoujade, 14 mars 1957). Enfin, une large part est laissée aux problèmes de technologie avec près d’un tiers des titres qui contiennent une référence aux méthodes de production des hautes températures – le plus souvent des fours

⁶ Si l’on croit *Le Nouveau Petit Robert* [2002], la chimie serait aujourd’hui définie comme la « science de la constitution des divers corps, de leurs transformations et de leurs propriétés » (p. 426).

solaires, à plasma, à induction – et 16% qui précisent une pratique de « mesures » – qu’elles soient thermiques ou analytiques –.

Ainsi, au cours de la décennie 1950, la Commission des hautes températures et des réfractaires est passée d’un mode d’expression ponctuel – la rédaction et l’édition d’un ouvrage collectif sur la chimie des hautes températures – à un espace social structuré, permettant à ses membres de se rencontrer, de se connaître et d’échanger aux niveaux scientifiques et techniques. La communauté s’est institutionnalisée selon un schéma classique. L’organisation de la Commission, dirigée par Lebeau puis par Chaudron, est restée fidèle aux impératifs de mixité des solides étudiés – ioniques, métalliques, métalloïdes – mais aussi à une complémentarité entre une recherche fondamentale – synthèse et étude de nouveaux composés – et une recherche appliquée – production de hautes températures et mises au point d’instruments de mesure adéquats –. Par son nom, par la constitution de son bureau directeur, par l’affirmation de son orientation principale, la Commission se réclame de la chimie. Or, dans le titre des exposés, les deux préoccupations majeures font référence à la constitution et à la transformation des corps solides. Être chimiste des hautes températures, c’est avant tout être intéressé par des substances et leurs transformations sous haute température. Même si la chimie est la plus représentée, elle ne constitue qu’un des aspects de la Commission.

V.1.1.2. Un territoire métissé, ouvert aux autres et structurant

En terme disciplinaire, les membres de la Commission ne proviennent pas uniquement de la chimie minérale universitaire. Chimie métallurgique – la *Chaudronnerie* en tête –, thermodynamique chimique – avec Bonnier mais aussi les diagrammes de phase –, thermodynamique physique – avec l’école de Cabannes à Bellevue –, quelques velléités d’électrochimie – on peut penser à la présence de Lucien Andrieux par le passé (II.3.) –, physique des plasmas – pour le fonctionnement des fours à plasma –, se taillent une part importante des communications des séances semestrielles. Une telle diversité disciplinaire se comprend dans la mesure où le point de convergence se situe autour d’une question technique, les hautes températures, et non pas dans la délimitation d’un espace « élémentaire » du tableau périodique. La Commission répond au même éclectisme que l’état solide d’après-guerre. Par la diversité de sa population, la Commission constitue un espace métissé par de nombreuses influences disciplinaires.

Il pouvait sembler étrange que les mots-clés renvoyant aux applications soient si peu nombreux dans l’analyse des titres d’exposés. Une si faible occurrence est problématique puisque, depuis les années 1920, le Comité Rothschild puis la Commission CNRS plaident pour une synergie entre fondamental et appliqué. L’analyse linguistique n’est pas infaillible. En effet, si les titres sont discrets sur les applications, ce n’est pas forcément qu’elles sont absentes des préoccupations des membres de la Commission. De manière générale, les technologies instrumentales – en particulier la construction et la mise au point de fours –, si elles servent d’abord à la synthèse de solides, sont aussi envisagées comme objets pouvant être commercialisés. Certains universitaires présents sont impliqués sur les catalyseurs : Teichner de l’Institut de recherches sur la catalyse (IRC) [Voillequin, 2005] mais aussi Bénard, qui s’est tourné vers les interactions solide-gaz (« titane-soufre »). Foëx et Trombe de leur côté se préoccupent de questions énergétiques, en particulier d’utilisation de l’énergie solaire (V.2).

De plus, les industriels jouent un rôle actif au sein de la Commission. Ils participent aux séances, ils y exposent autant que les universitaires. La Commission valorise les travaux appliqués. Au même titre que les travaux de recherche pure, les recherches industrielles et les

recherches universitaires tournées vers les applications sont récompensées par la Commission au travers de la « médaille Lebeau ». Celle-ci, créée par la Commission au départ de Lebeau, récompense chaque année une personnalité pour ses travaux dans le domaine de la chimie des hautes températures. Entre 1957 et 1964, cinq universitaires et quatre industriels sont récompensés. Parmi ceux-ci, deux scientifiques de sociétés privées – Le Carbone-Lorraine, Saint-Gobain – et deux d’organismes d’État – CEA et IRSID – sont primés.⁷ Ainsi, la Commission abrite en son sein thermodynamiciens et chimistes, verriers et métallurgistes, industriels nucléaires et des réfractaires, universitaires et techniciens. À cette diversité culturelle correspond donc un brassage interne des pratiques et des objectifs autour des hautes températures.

L’ouverture ne se fait pas seulement par agrégation d’individus venant de réseaux différents. La Commission, collectivement, cherche d’une part à fédérer plus largement au sein de la communauté française, d’autre part à s’ouvrir à l’étranger. Elle profite de l’audience de la Société chimique de France (SFC) et publie la plupart des exposés des séances internes sous forme d’articles dans le *Bulletin de la Société chimique de France*. Les chimistes français reçoivent donc l’écho de la salle des Actes : l’intégralité des exposés mais pas les discussions, qui restent confidentielles. Outre cette influence éditoriale, la Commission modèle le paysage national des hautes températures en organisant des colloques plus larges, ouverts aux non membres. C’est Lebeau, alors qu’il était président, qui avait lancé l’idée d’un colloque national sur la « chimie des hautes températures ». Finalement organisé par Ribaud (président) et Trombe (assistant), le colloque se tient à Paris, en mai 1954, durant trois jours. Ils rassemblent de nombreux universitaires – « professeurs », « chefs de travaux », « chercheurs du CNRS » –, des industriels français et « auditeurs étrangers ». Les organisateurs se félicitent du « nombre des souscriptions recueillies [pour les publications qui] témoigne de l’intérêt soulevé tant à l’étranger qu’en France, par les travaux présentés. » [RA CNRS, 1954, p67]. Sitôt élu président de la Commission, Chaudron reprend l’idée et organise, avec le bureau, un deuxième colloque national le 28 novembre 1957. Plus limité dans le temps – une seule journée au lieu de trois –, le colloque rend néanmoins compte, d’après les organisateurs, d’« un développement considérable des recherches dans cette science des hautes températures, recherches dont les conclusions intéressent aussi bien le domaine scientifique que celui des applications techniques » [RA CNRS, 1958].

Si la Commission cherche à structurer les hautes températures à son voisinage et à discuter avec la communauté française, elle interagit aussi plus directement avec l’étranger. Individuellement d’abord, lorsque des membres de la Commission se déplacent à l’étranger, ils exposent ce qu’ils ont pu y voir.⁸ Collectivement surtout, lors des congrès, la Commission envoie des ambassades – de plus en plus nombreuses – pour obtenir des informations ou faire des communications. En juin 1956, Parisot assiste à un symposium national « Haute température – Un outil pour l’avenir » à l’université de Berkeley. Il en fait un compte rendu à la séance du 14 mars 1957 [RA CNRS, 1957, p. 97]. Du 6 au 9 octobre 1959, un premier « Symposium [international] sur la technologie des hautes températures » est organisé à Asilomar (Californie, États-Unis) par le *Stanford Research Institute*. La Commission y investit plus de forces en envoyant deux « rapporteurs » : Foëx pour rendre compte des

⁷ Lebeau (1957) ; Foëx (1958) ; Jean Parisot (1959), « directeur des Laboratoires de Recherches de la société Le Carbone-Lorraine » ; Léon Moreau (1960), second de Chaudron au CECM ; M. Peychès (1961), « directeur scientifique des Établissements Saint-Gobain » ; Ribaud (1962), thermicien ; Roger Caillat (1963), « directeur de service au Commissariat à l’énergie atomique » ; Paul Kozakevitch (1964), « directeur du service de chimie de l’Institut de recherches de la sidérurgie » [RA CNRS, 1958-1965].

⁸ À la séance du 6 mars 1958, Teichner fait un compte rendu de sa « visite de l’Institut de recherches de l’université Temple à Philadelphie » [RA CNRS, 1958, p. 153].

« techniques particulières aux hautes températures, et plus spécialement leur production et des déterminations des propriétés des matériaux » et Collongues pour les « matériaux réfractaires » [RA CNRS, 1960, p. 199]. Dès la séance qui suit leur retour – celle du 10 décembre –, ils exposent ce qu'ils ont vu et entendu aux membres de la Commission. L'importance du symposium est frappante : près de huit cents participants, américains pour la plupart, à comparer aux trente-cinq Français présents en salle des Actes ce jour-là. Portant sur la « technologie des hautes températures », le symposium propose, outre des communications orales, des visites de laboratoires sur l'ensemble du territoire des États-Unis. À une majorité de participants du Nouveau Monde correspond une prédominance des communications états-uniennes : dix-huit des vingt-trois contributions contre quatre pour l'Europe – une par pays, Allemagne, France, Grande-Bretagne, pays Scandinaves – et une pour le Japon.⁹ Les rapports étrangers sont supposés donner un aperçu sur les recherches nationales respectives. Foëx et Trombe assurent la communication pour la France.¹⁰ À la fin de son compte rendu, Foëx insiste sur deux conclusions générales du symposium : premièrement, l'avenir prometteur des « chalumeaux à plasmas [...] tant sur le plan de la recherche scientifique que sur le plan industriel [car] les rendements électriques de tels appareils [sont] fort élevés » ; deuxièmement, les « fours à images », au contraire, resteront confinés dans les laboratoires de recherche à cause de rendements trop faibles. Quatre ans après le premier symposium d'Asilomar, un deuxième est organisé dans les mêmes conditions, du 8 au 11 septembre 1963. Alors que l'effectif total baisse – on passe de huit cents à cinq cents participants –, les membres de la Commission sont plus nombreux, non plus deux mais six représentants.¹¹

L'ouverture n'est pas de pure forme et l'influence étrangère sensible. Ainsi, lorsque la Commission décide d'organiser un troisième congrès national les 11 et 12 décembre 1962, au lieu de proposer un intitulé général comme pour les précédents, elle choisit un thème spécifique : les « chalumeaux et fours à plasma ». Comment ne pas rapprocher ce choix des conclusions prospectives du premier symposium d'Asilomar ?¹² La Commission, fidèle à sa double orientation fondamentale et appliquée, a opté pour un thème prometteur à la fois pour la recherche et pour l'industrie, délaissant les « fours à images », qui ne sont pas rentables industriellement. L'exemple d'Asilomar montre comment un énoncé prospectif – non

⁹ Il y a quelque chose de frappant dans la similitude des pays invités au symposium d'Asilomar (1959) et ceux qui étaient présents au colloque de Paris (1948) et au dixième Conseil Solvay (1956) – mis à part le Japon –. Y aurait-il, au niveau occidental, un même parallélisme entre la chimie de l'état solide et la chimie des hautes températures qu'au niveau français ? Si les rapporteurs européens d'Asilomar ne sont pas ceux de Paris et Bruxelles, est-ce parce qu'ils appartiennent à des communautés différentes ou parce que mes investigations n'ont pas été assez poussées dans le cas de ces pays ? Y aurait-il un lien intrinsèque fort entre hautes températures et composés solides qui dépasse les contingences nationales ? Questions ouvertes.

¹⁰ Les participants visitent les laboratoires suivants : *Stanford Research Institute* (qui organise), *University of California*, *California Institute of Technology (Caltec)*, *Giannini Plasmadyne* (Santa Ana), *National Bureau of Standards* (Washington), *Research Institute of Temple University* (Philadelphie). Les communications quant à elles portent essentiellement sur quatre thèmes : « Fours à images », « Chalumeaux à plasma », « Matériaux et procédés utilisables pour la réentrée » et « Pyrométrie ». En ce qui concerne les étrangers, l'Allemand Lochte-Holtgreven parle de « domaines intéressants essentiellement les gaz », le Britannique James White de « mécanisme de frittage, céramiques de diverses natures, cermets et réfractaires utilisables dans la construction des fours », le Scandinave H. Flood de « matériaux réfractaires métalliques et non métalliques ainsi que sur les sels fondus », le Japonais Hisao Mii de « description de petits fours solaires » [Foëx, 1961].

¹¹ À Foëx et Collongues qui étaient déjà présents au premier symposium, il faut ajouter Cabannes, J.-P. Fidelle, François Galtier (étudiant de Collongues) et D. Yerouchalmi (service de physique appliquée du CEN Saclay, CEA) [RIHTR, 1964, p. 173-188]. Quatre autres Français – non issus de la Commission – sont aussi présents au symposium. La délégation française avec dix représentants constitue un cinquième des étrangers, qui sont 50 au total. La proportion d'étrangers par rapport aux Américains est de 10%.

¹² Le compte rendu de Foëx devant les membres de la Commission date du 10 décembre 1959 tandis que la décision d'organiser « un colloque national sur les chalumeaux à plasma » est annoncée à la séance du 23 mai 1962 [RA CNRS, 1962, p. 419], soit un intervalle d'un peu plus de deux ans de mûrissement de l'idée.

rentabilité des fours à images – influence les décisions qui sont prises par la suite – on se concentre sur les fours à plasma au congrès de 1962 – Croire une prophétie puis la réaliser renforce logiquement la prophétie initiale. Réciproquement, la Commission ne passe pas inaperçue à l'étranger. Ainsi, lorsqu'en 1959 celui qui a incarné pendant près de quarante ans la chimie française des hautes températures meurt, il reçoit un hommage européen.¹³ De plus, en août 1961, une forte délégation de la Commission – six membres – se déplace au « 18^e Congrès international de Chimie pure et appliquée » à Montréal pour participer « aux travaux de la Section des hautes températures ». On retrouve les notables de la Commission : Chaudron, Trombe, Foëx, Flahaut, Collongues, Cabannes [RA CNRS, 1961, p. 260].

Pour résumer, les années 1950 sont marquées par une intense activité dans le domaine des hautes températures au sein du monde occidental, en particulier aux États-Unis. Ce qui en ces temps de guerre froide est à rapprocher d'enjeux d'armement et d'applications stratégiques comme l'aérospatiale ou le nucléaire. Domaine situé à l'interface de plusieurs secteurs d'activité, les hautes températures forment des communautés entre industrie et université, entre chimie et physique, entre verriers et métallurgistes. En France, elles sont centrées autour d'un pôle chimique puissant dont l'incarnation institutionnelle la plus aboutie est la Commission de chimie des hautes températures et des réfractaires du CNRS. Celle-ci peut être vue comme un espace métissé au carrefour des disciplines scientifiques et des technologies industrielles qui cherche autant à structurer une communauté française des hautes températures qu'à interagir avec les communautés étrangères, en particulier américaine. Et elle y parvient : édition, échanges internes, exposés formels et discussions informelles, colloques nationaux, rencontres internationales, système de récompenses protocolaires... Les échanges internationaux s'intensifient, les ambassades déléguées dans les congrès internationaux sont de plus en plus conséquentes. Au cours des années cinquante, le centre de gravité symbolique de cette nébuleuse se déplace de la faculté de pharmacie de Paris – place-forte de la famille Lebeau – vers le CECM, sur les bords de Seine, à Vitry – capitale de la *Chaudronnerie* –. La famille Trombe, institutionnellement plus faible que les deux autres familles, parvient pourtant à bien défendre sa place. Malgré quelques outsiders thermodynamiciens – Bonnier pour la chimie, Cabannes pour la physique – le cœur du complexe des hautes températures trouve donc sa place parmi les tenants de la chimie de l'état solide. Avant d'envisager dans comment les hautes températures évoluent par rapport à la chimie de l'état solide puis à la chimie du solide, on peut s'arrêter une dernière fois sur la Commission des hautes températures pour en interroger la nature sociale et cognitive.

V.1.1.3. Les hautes températures comme mode de production transversal

En 1945, le CNRS a constitué une trentaine de « commissions d'études » d'inspiration multidisciplinaire, à l'interface entre science et technique (I.2.3). Parmi elles, la Commission de chimie des hautes températures et des réfractaires offre un cas particulier intéressant par sa longévité¹⁴, son organisation et sa productivité (II.3, V.1). Forte d'un beau palmarès, la Commission se scinde en deux en 1964, son bureau ayant décidé la création d'une « Société des hautes températures et des réfractaires » [RA CNRS, 1963, p. 491]. La Commission conserve deux prérogatives anciennes : l'édition d'un ouvrage de *Traité des hautes températures* prévu

¹³ Le 26 février 1960 une cérémonie du souvenir est dédiée à Lebeau à la SFC. Les orateurs qui prononcent l'éloge funèbre sont quatre universitaires internationalement reconnus : Hemeleus (anglais), Hedvall (suédois), Hoppe (allemand) et Chaudron (français) [BSCF, 1961, p1-25].

¹⁴ La Commission des hautes températures a l'une des plus longues longévités puisque sur les trente du départ, il n'en reste que 11 en 1959 [RA CNRS, 1959, p. 18-19].

pour 1965 qui rappelle celui de 1950 – mais qui sera finalement édité avec du retard, en 1973 [Chaudron & Trombe, 1973] – et l'organisation du colloque international sur les « propriétés physico-chimiques et mécaniques des corps réfractaires à haute température », qui se tiendra à Paris du 28 juin au 1^{er} juillet 1965.¹⁵ En revanche, elle perd l'organisation des séances internes au profit de la Société « qui se réunit [désormais] tous les deux mois pour entendre l'exposé des travaux originaux ».

La principale innovation introduite par la Société est la publication d'une nouvelle revue spécialisée, subventionnée par le CNRS, la *Revue des hautes températures et des réfractaires (RHTR)* [RA CNRS, 1964, p. 583]. L'éditeur scientifique choisi, Masson et Compagnie, dispose de la confiance du groupe puisqu'il a déjà publié *Les Hautes Températures et leurs utilisations en Chimie* en 1950. Collongues est « rédacteur en chef » tandis que Chaudron, Trombe et Flahaut sont respectivement président, vice-président et secrétaire général (ce qui correspond à leur position à la Commission). Le comité de rédaction réunit quinze Français, gravitant autour de la Commission, et huit membres associés étrangers : trois Américains, un Japonais et quatre Européens.¹⁶ Chaudron profite de son appartenance à l'Académie des sciences pour y faire la promotion de la *Revue*. À cette occasion, il rappelle le succès de « l'école française sur la physique et la chimie des hautes températures [...] au cours des dix dernières années » mais déplore son manque de visibilité en France et à l'étranger en raison de la dispersion des publications de nombreuses revues [CRAS, 1964, t. 258, p. 263]. Trimestrielle, la *RHTR* devrait permettre de publier non seulement les exposés oraux de chaque réunion mais encore des articles spécifiques tournés vers les hautes températures et les thèses des laboratoires concernés par ces questions. Après deux ans de parution, la *Revue*, bien acceptée en France, a déjà un lectorat fidèle. C'est le moment que choisissent ses fondateurs pour la rendre internationale : en 1966, elle devient la *Revue internationale des hautes températures et des réfractaires (RIHTR)*. En gardant la même direction, le comité de rédaction s'élargit (de 23 à 30 membres) et s'ouvre considérablement à l'étranger (27 sur 30), surtout vers le bloc de l'Est et l'Europe occidentale.¹⁷

Malgré des trésoreries séparées, la Société se veut l'organe centralisateur dont l'appendice essentiel est la *Revue*.¹⁸ La scission de 1964 transfère les principaux attributs communautaires à la Société au détriment de la Commission. En effet, une communauté se

¹⁵ Suite à la scission, la Commission perd de l'importance – contrairement à la Société – sans disparaître. Le dernier rapport d'activité général la mentionnant date de 1965. Cette date correspond à un changement de format des rapports qui d'une présentation générale passe à une classification par sections. La section « chimie minérale » ne mentionne plus la Commission dans les rapports suivants. Autre indice : en 1966, l'organisation d'un deuxième colloque international est assurée par la Société et non plus par la Commission. Cependant, la Commission ne disparaît pas puisque Flahaut en est secrétaire de 1956 à 1969 [Flahaut, 1976, p. 5].

¹⁶ La composition du comité est la suivante : Bénard, E. Bonnier, Cabannes, Caillat, Chaudron, Desmarquest, Flahaut, Foëx, Michel, G. Pannetier, P. Paquin, Peychès, Teichner, Trombe, Urbain pour les Français et les associés étrangers : N. Bright (Ottawa, Canada), P. Duwez (Pasadena, USA), Hedwall (Göteborg), T. Laszlo (Wilmington, USA), M. Lepingle (Bruxelles), H. Mii (Nagoya, Japon), H. Nowotny (Vienne), P. Towlson (Londres).

¹⁷ En 1966 seuls onze membres restent : Bonnier, Bright, Cabannes, Duwez, Foëx, Hedwall, Laszlo, Lepingle, Mii, Nowotny, Towlson. Les dix-neuf entrants sont : G. Bilznakov (Bulgarie), G. Brauer (Allemagne), C. Brisi (Italie), W. Brozowski (Pologne), L. Deffët (Belgique), G. de Maria (Italie), A. Dietzel (Allemagne), H. Flood (Norvège), A. Grosse (USA), J. Hlavac (Tchécoslovaquie), Magneli (Suède), P. Popper (Grande-Bretagne), P. Reijnen (Pays-Bas), N. Rykalin (URSS), G. Samsonov (URSS), H. Schwiete (Allemagne), R. Thakur (« Indes » au pluriel !), R. Walker (USA), J. White (Grande-Bretagne).

¹⁸ En effet, les trésoreries de la Société et de la *Revue* sont distinctes : l'éditeur Masson pour celle-ci, le trésorier de la Société pour celle-là (J.-M. Desmarquest à Sèvres). L'abonnement annuel à la revue – quatre numéros – coûte 70F en 1964 (84 euros 2006), la cotisation de la Société coûte 20F (24 euros 2006). Cependant, il existe une volonté de coupler les deux entités : 1° les renseignements administratifs relatifs à la Société sont indiqués au début de chaque numéro la *RHTR* ; 2° il existe une incitation budgétaire pour cumuler la cotisation à la Société et l'abonnement à la revue : une réduction de 10F (12 euros 2006).

définit d'abord comme histoire d'un groupe au cours du temps. Or, les manifestations périodiques – revue trimestrielle et réunions bimestrielles – dépendent désormais de la Société tandis que la Commission garde les manifestations ponctuelles – un ouvrage et un colloque –. Le centre de gravité de la communauté des hautes températures se déplace donc vers la Société. Cette translation entraîne deux évolutions majeures. Tout d'abord, elle libère le groupe de la tutelle disciplinaire de la chimie : le mot « chimie » disparaît du nom et la Société française de chimie cesse d'éditer les séances ; et de sa dépendance vis-à-vis du CNRS tout en opérant une orientation vers les applications : le CNRS n'est plus que bailleur de fonds de la *Revue*, qui elle-même se réclame des « réfractaires », domaine éminemment appliqué, et d'autre part, le mot « société » fait référence aux industries privées. La mise en place de la revue relève donc d'une logique d'autonomisation de l'espace des hautes températures, qui veut s'affirmer comme entité visible, non disciplinaire et tournée vers les applications. Au delà de l'aspect rhétorique de la manœuvre,¹⁹ quelles remarques peut-on tirer de ce glissement ? Dans quelle mesure la communauté des hautes températures peut être rapprochée d'un « régime transversal » de production de savoirs ?

Cette question renvoie à un débat actuel en sociologie des sciences. Prenant le contre-pied des théories « différentiationnistes » ou « anti-différentiationnistes », des sociologues ont forgé le concept de « régime transversal » de production de savoirs [Joerges & Shinn, 2001]. Centré sur l'instrumentation, le « régime transversal » est défini par trois caractéristiques : 1°) focalisation sur l'instrument dans ses possibilités « génériques » – par opposition à spécifiques –, c'est-à-dire avec une volonté de généraliser ce qui est conçu localement ; 2°) l'arène sociale du groupe concerné est essentiellement « interstitielle », c'est-à-dire que les acteurs, mouvants, opèrent entre les disciplines et les institutions établies ; 3°) le champ d'action est non limité par des « frontières » disciplinaires [Shinn & Ragouet, 2005, p171-172].

Voyons comment chacune de ces lignes de force s'articule dans le cas de la communauté française des hautes températures. Pour simplifier, j'assimilerai celle-ci au noyau dur de la Commission et de la Société.²⁰ L'éditorial de la *Revue des hautes températures et des réfractaires* de 1964 donne l'occasion à Chaudron de réaffirmer le projet porté par la revue [RHTR, 1964, p. 2-3]. Les hautes températures sont perçues comme un « domaine » – différent d'une discipline – en plein essor. L'« école française » se réclame simultanément de la « chimie » et de la « physique » des hautes températures mais y associe aussi les métallurgistes et les céramistes. Le champ d'action s'affirme donc comme trans-disciplinaire (3). On peut cependant remarquer que, malgré la volonté de se placer au delà des découpages traditionnels de l'université française, la plupart des dirigeants du projet sont étiquetés comme « minéralistes ». Puisque la Commission associe à parité des universitaires et des industriels des organismes privés et publics, on peut se demander si elle est « interstitielle ». Elle ne l'est pas dans la mesure où elle correspond à une entité du CNRS, quoique marginale ;²¹ mais elle est interstitielle dans la mesure où elle est issue du Comité Rothschild – institution non académique – et qu'elle conduit à la Société des hautes

¹⁹ J'entends ici par « aspect rhétorique » la continuité relative du projet puisque ce sont les notables de la Commission – Chaudron, Trombe, Foëx, Collongues et Flahaut – qui entreprennent la création de la Société puis qui assurent son fonctionnement et décident de son orientation.

²⁰ Le but n'est pas ici de délimiter rigoureusement la « communauté française des hautes températures ». Les éléments développés jusqu'à présent – Comité Rothschild, Commission CNRS et Société des hautes températures – en donnent une idée partielle. Il s'agit plutôt de voir en quoi le tournant de 1964 permet d'appréhender cet espace structuré en fonction de modèles théoriques.

²¹ Lanciano-Morandat [1999] par exemple ne mentionne même pas les commissions scientifiques comme moyen d'intervention du CNRS dans son étude sur le département des sciences chimiques.

températures et des réfractaires, société privée.²² Par le salaire qu'ils touchent, les membres de la communauté peuvent être classés soit comme universitaires, soit comme industriels, mais par leur appartenance au groupe, ils interagissent avec d'autres institutions que la leur. Les séances de la Commission puis celles de la Société constituent l'un des lieux de rencontres et d'échanges. Collectivement, on pourrait dire que la communauté est « interstitielle » alors qu'individuellement les acteurs occupent, pour la plupart, une position institutionnelle fixe. Est-ce à dire que la condition (2) est remplie ? Dans l'introduction de leur ouvrage, Joerges et Shinn [2001] précisent que le « mode transverse » s'appuie sur les institutions existantes pour mener des projets – le CNRS dans le cas des hautes températures – mais que ces projets les dépassent rapidement et fondent de nouvelles organisations instables – comme la Société qui est extérieure au CNRS –. Il semble donc que la communauté remplisse la deuxième condition même si les acteurs ne sont pas vraiment des « *moving targets* ». L'effort de la communauté porte principalement sur la production de hautes températures, c'est-à-dire de « fours », et accessoirement de leur mesure.²³ Depuis le Comité Rothschild jusqu'à la Société, c'est-à-dire entre 1921 et 1964, les technologies des hautes températures sont envisagées comme trait d'union entre recherches fondamentale et appliquée. Ce faisant, il s'agit non pas de stimuler un amarrage local – laboratoire universitaire ou chaîne de production industrielle – mais de favoriser des savoir-faire locaux pour les réutiliser ailleurs. À ce titre le colloque national de 1962 sur les « chalumeaux et fours à plasma » est emblématique de cette volonté de migration, de propagation des technologies entre les mondes. La communauté conçoit avant tout le four comme un instrument « générique » (1) que l'on peut étudier pour lui-même mais qui permet surtout de fabriquer des matériaux – « réfractaires » ou autres –.

Ainsi, la communauté des hautes températures, malgré la stabilité institutionnelle de ses membres, étend son influence aux interstices entre technologie et science, entre appliqué et fondamental, entre privé et public, entre industrie et université. Elle revendique un décloisonnement disciplinaire et une utilisation générique des fours, de plus en plus standardisés. Ces éléments permettent de la ranger au sein du « mode transverse » de production des savoirs et de l'assimiler plus particulièrement à ce que Shinn [1997] a défini comme « *research-technology* ». Cette volonté d'être aux frontières, héritée de la tradition d'entre-deux-guerres du Comité Rothschild, explique probablement en France la force particulière de cette chimie qui, dans le domaine des hautes températures, donne même des idées à la physique. À la fin des années 1960, le CNRS décide en effet de développer la physique des hautes températures en transférant le Laboratoire des échanges thermiques de Bellevue sur le nouveau campus d'Orléans et de créer un grand Centre de recherches sur la physique des hautes températures (CRPHT). Ce sont deux physiciens de la Commission de chimie, Cabannes et Anthony, qui sont choisis pour développer ce centre devant permettre à la physique de rattraper son retard.²⁴ Ils le dirigeront tour à tour par la suite. Les objectifs

²² Je n'ai pas approfondi le statut juridique de la Société mais il semble qu'elle est indépendante du CNRS et de l'université. Son trésorier par exemple est le président directeur général des Établissements Desmarquest, l'adresse du siège social est le 89 rue Monceau, dans le huitième arrondissement de Paris, où nul établissement académique n'est installé.

²³ La métrologie n'étant pas au cœur de la communauté, celle-ci n'est pas assimilable à la « *research-technology* » dont les critères sont communautés interstitielles, appareils génériques et métrologie, qui instaure une *lingua franca* [Joerges & Shinn, 2001, introduction et conclusion].

²⁴ Comparer la force d'une discipline par rapport à une autre est délicat pour l'historien. Cette assertion repose sur trois éléments 1°) je n'ai pas trouvé une communauté de physiciens équivalente à celle de chimie des hautes températures ; 2°) le faible nombre de laboratoires s'intéressant aux hautes températures pour la physique. Par exemple, le rapport de conjoncture de 1959 pour la section « Thermodynamique et propriétés mécaniques » mentionnent seulement trois laboratoires pour les « recherches aux hautes températures » : à Grenoble sur les alliages, à Bellevue (Cabannes) et Montlouis (Trombe) pour les réfractaires [RC CNRS, 1959, p. 101]. Parmi ces trois, deux laboratoires appartiennent à la Commission de chimie ; 3°) les conclusions d'un rapport régional du

initiaux sont étonnamment proches de ceux de la communauté de chimie : « mesure », « production des hautes températures » et étude des « propriétés physiques des matériaux ». Proposons une hypothèse plus audacieuse : la faiblesse relative de la physique des hautes températures – qui fait qu'elle copie la chimie – ne constituerait-elle pas justement la raison suffisante qui a incité quelques physiciens à se rapprocher durant les années 1950 de cette chimie forte et qu'en retour, ce rapprochement a consolidé son triomphe au cours des années 1960 ?

V.1.2. Les hautes températures, de l'indépendance à la dissolution d'une communauté (1960-1970).

V.1.2.1. Convergences des hautes températures et de la chimie de l'état solide vers 1960

La communauté française des hautes températures contient les éléments principaux d'un « régime transversal » de production de savoirs et de savoir-faire sur la période 1921-1964 (V.1.1.3). Les mandarins qui la dominent sont pour la plupart attachés à la chimie minérale. Ils ne s'intéressent donc pas vraiment à la fondation d'une nouvelle discipline universitaire et préfèrent plutôt placer la technologie des hautes températures au cœur de leur projet. Ils recherchent une ouverture vers l'industrie et l'étranger. Ce qui paraît étonnant au premier abord c'est que le cœur de la chimie des hautes températures – entité transversale – rejoint celui de la chimie de l'état solide – orientation disciplinaire –. Au sein de la section chimie minérale du CNRS, les deux domaines « chimie de l'état solide » et « chimie des hautes températures » sont considérés comme aussi importants l'un que l'autre mais distincts [RC CNRS, 1959]. Le rapport de conjoncture de 1960 pousse en particulier à « donner aux recherches sur les hautes températures et leurs applications un développement aussi poussé que possible. » [RC CNRS, 1960, p. 172].

À y regarder de plus près pourtant, il peut paraître artificiel de distinguer ces deux domaines qui convergent sur trois points : individuels, institutionnels, épistémologiques. Hautes températures et chimie de l'état solide sont fréquentées par les mêmes personnes. Lorsque Collongues, porteur d'un mandat de la Commission des hautes températures et des réfractaires, se rend au premier symposium international d'Asilomar (1959), il profite d'une visite au *National Bureau of Standards* à Washington pour donner une conférence intitulée « *New results on non-stoichiometric compounds* » [Collongues, 1979, p20]. La chimie de l'état solide s'appuie sur la notoriété des hautes températures pour s'exprimer. Lorsque Roger Caillat reçoit la médaille Lebeau en 1963, c'est aussi au nom du service « chimie des solides » qu'il dirige au CEN Saclay. Les hautes températures reconnaissent l'importance de la chimie de l'état solide comme point d'ancrage dans la matière. Les liens personnels qui se sont créés sont durables. Ainsi, à partir de 1970, sous l'égide de l'ADERP, trois membres de la

CNRS pour la région Centre [CNRS, 1989, CRPHT]. Alors qu'il suit l'édification du Centre de recherches sur la physique des hautes températures, ce rapport raconte que « dans les années 1960, les recherches dans le domaine des hautes températures ont en France une grande vitalité, en particulier en chimie des hautes températures. La course aux températures extrêmes motive les chercheurs, et les résultats obtenus placent la France à l'une des meilleures places. Mais dans le domaine de la physique, les travaux étaient beaucoup moins avancés, la création d'un nouveau laboratoire [CRPHT] était donc souhaitable. » Même si ce rapport a tendance à glorifier le CRPHT en minimisant la force du domaine avant son arrivée, les trois faisceaux d'indices convergent pour souligner la faiblesse de la physique française des hautes températures.

communauté, Anthony (physicienne), Collongues (chimiste) et Lacombe (métallurgiste), co-organisent des « stages de formation permanente » à l'université d'Orsay sur les matériaux de haute température et leurs propriétés.²⁵ Ces stages ont vocation à réunir universitaires (physiciens et chimistes) et industriels (métallurgistes, céramistes, verriers). Le premier stage vise trois types principaux de matériaux « réfractaires » : métaux et alliages ; oxydes ; graphite, carbures et borures. Ces cinq jours de stage, du 30 novembre au 4 décembre, associe des exposés, des tables rondes à une visite du Centre de recherches sur la physique et la chimie des hautes températures, nouvellement créé à Orléans et dirigé par Cabannes [RIHTR, 1970, t.7, p177].

Les deux domaines impliquent les mêmes institutions. Les mêmes laboratoires d'abord. Le rapport de conjoncture de 1960 fait un état des lieux des laboratoires impliqués dans les hautes températures. On retrouve les chimistes de l'état solide (A.III.1) : le Laboratoire de l'énergie solaire (LES), le CECM, les laboratoires de chimie minérale dirigés par Flahaut, Bénard, Chrétien, Michel, Bonnier, Hagenmuller, Montel ainsi que divers laboratoires déjà mentionnés : celui d'électrochimie à Grenoble, de chimie générale à la Sorbonne, des échanges thermiques à Bellevue (Cabannes), de thermodynamique à haute température à Poitiers [RC CNRS, 1960, p. 173]. Les colloques peuvent aussi être organisés sous la double égide. Ainsi, du 27 septembre au 1^{er} octobre 1971, la Société des hautes températures organise un colloque international du CNRS à Odeillo « sur l'étude des changements de forme cristalline au-dessus de 1800°C ». Le comité d'organisation, présidé par Chaudron, associe des membres de la communauté : Y. Letort, Anthony, Collongues, Foëx (organisateur) à des personnalités universitaires françaises : Bertaut, A. Authier (cristallographe), Hagenmuller (chimie minérale). L'objectif du colloque concerne aussi bien les caractérisations instrumentales (de haut niveau) à l'étude « de métaux, d'oxydes, de carbures ou d'autres éléments ou composés réfractaires ».²⁶

Hautes températures et chimie de l'état solide partagent aussi des orientations épistémologiques semblables. À son retour d'Asilomar en 1959, Foëx insiste sur le « grand intérêt suscité par les nouveaux dispositifs permettant d'effectuer des mesures physiques à haute température » [Foëx, 1961]. Par cette injonction, formulée à un congrès de « technologie des hautes températures » puis retranscrite au BSCF, la communauté française est une nouvelle fois sensibilisée à la caractérisation des solides par les propriétés physiques. En 1963, le deuxième symposium d'Asilomar réitère le commandement. De surcroît, la moitié des exposés du symposium traitent de « réactions chimiques » et de « matériaux utilisables », ce qui correspond aux thèmes chers de la chimie de l'état solide. Cette mention « matériaux » est d'ailleurs antérieure de quelques années à la mode qui va se développer en France à partir de la fin des années 1960 (III.4.3). Par leur position à l'interface, les hautes températures convainquent le milieu universitaire de l'importance de la dimension appliquée du « matériau », qui est une évidence depuis longtemps pour les industriels. Elles constituent ainsi une passerelle supplémentaire qui pousse les « matériaux » vers la chimie du solide des années 1960 puis 1970 (III.4.3).

Par une triple convergence – de personnes, d'institutions, de méthodes –, la chimie des hautes températures vient féconder la chimie de l'état solide en train de devenir chimie du

²⁵ L'ADERP est l'Association pour le développement de l'enseignement et des recherches auprès des facultés des sciences de l'université de Paris. Pour les différentes années, on propose : « Matériaux de haute température » (1970) ; « Propriétés physico-chimiques des matériaux de haute température » (1971) ; « Conductivités électriques et thermiques » (1972) ; « Propriétés mécaniques et réactivité » (1974) [Collongues, 1979, p. 3].

²⁶ Les méthodes utilisées à haute température sont : « diffraction X, diffraction neutronique, microscopie, analyse thermique, méthodes d'investigation physiques ou physico-chimiques » [RIHTR, 1970, t.7, n°4, p. 425].

solide. La synthèse à haute température constitue le point de rencontre. Il semble d'ailleurs qu'une telle proximité ne soit pas propre à la France puisqu'on peut repérer des individus à la jonction des deux communautés pour les États-Unis et la Grande-Bretagne.²⁷ Malgré ces convergences de vue et de personnes, la chimie de l'état solide est clairement distinguée de la chimie des hautes températures dans les rapports institutionnels du CNRS au tournant des années 1960 [RC CNRS, 1959 ; 1964]. Les physiciens et électrochimistes liés à la Commission des hautes températures ne sont d'ailleurs jamais considérés comme chimistes de l'état solide. Vers 1960, malgré les liens forts entre les deux domaines, on peut distinguer deux communautés (III.4, V.1.1). La recherche de la pureté constitue l'un des points de divergence.

V.1.2.2. Divergence des hautes températures vers la « pureté »

Une tendance forte qui anime la chimie des hautes températures durant près de vingt ans (1950-1970) est la recherche de la « pureté », menée par Chaudron en France. Synthèse et caractérisations y sont indissociablement liées. En octobre 1959, Chaudron organise un colloque international du CNRS sur « les nouvelles propriétés physiques et chimiques des métaux de très haute pureté ». L'objectif du colloque, surtout centré sur les travaux français récents, est de discuter l'effet de la « présence de très faibles quantités d'impuretés [dans les] métaux usuels tels que le fer et l'aluminium » sur leurs propriétés physiques.²⁸ Le CECM est le fer de lance de ce congrès. Chaudron « avait l'obsession du pur » [I Caro, 2005, p. 5]. Au cours des années 1950, suivant les travaux de Pfann sur la « fusion de zone » (1952), il a transposé aux métaux de transition – fer et aluminium notamment – ce qui avait été réalisé pour les semi-conducteurs un ou deux ans auparavant aux États-Unis. Il s'agit de déployer pour les métaux purs de transition de nouvelles propriétés mécaniques sur le modèle des nouvelles propriétés électroniques des semi-conducteurs. Au cours des années soixante, l'effort de purification des métaux se poursuit. En 1964, le rapport de la DGRST préparant le cinquième Plan de développement (1966-1970) associe les métaux « purs » aux « réfractaires » et en fait le premier des quatre sujets stratégiques. Il appelle explicitement à une généralisation de la « méthode de la fusion de zones » que ce soit pour les métaux « traditionnels » ou « nouveaux ».²⁹ En septembre 1966, Chaudron revient plus en détail sur l'élément phare de sa carrière : le fer en organisant un nouveau colloque international sur « le

²⁷ Parmi les 24 rapports présentés au symposium (1963) [RHTR, 1964, p. 179-180], deux auteurs sont considérés comme chimistes du solide. J.S. Anderson, alors au *National Chemical Laboratory* de l'université de Melbourne (Teddington, Australie), fait une communication sur les « effets de la non stœchiométrie dans les composés réfractaires », principalement des oxydes, de manière annexe des « carbures, nitrures, borures, siliciures ». Rustom Roy de *Penn State University* qui parle de « transformations de phases aux hautes pressions » est lui aussi reconnu en France comme un « solidiste » américain de poids [I Pouchard, 2004, p. 11].

²⁸ Du 12 au 14 octobre 1959, le colloque international « Les nouvelles propriétés physiques et chimiques des métaux de très haute pureté » est organisé par Chaudron. « Ce colloque [...] avait pour but de discuter des recherches récemment effectuées, notamment en France, sur les effets de la présence de très faibles quantités d'impuretés. Les nouvelles propriétés des métaux usuels tels que le fer et l'aluminium, lorsque leur purification est poussée à l'extrême par les méthodes physiques les plus modernes, ont été particulièrement mises en évidence. » [RA CNRS, 1959, p. 30-31].

²⁹ « A ces besoins correspondent les thèmes suivants de recherches prioritaires :

a) chimie des métaux réfractaires et des métaux purs : méthodes d'élaboration des métaux rares appelés à avoir des applications industrielles (niobium, tantale, zirconium, beryllium, tungstène, lithium, éléments des terres rares). Mention doit être faite, à cet égard, des métallurgies utilisant les halogénures métalliques comme intermédiaires, des procédés électrolytiques en milieu de sels fondus, des procédés utilisant les composés organo-métalliques, des attaques par les dérivés halogénés (développement de la chimie du fluor). Purification ultime des métaux traditionnels et des métaux nouveaux (en particulier généralisation de la méthode de la fusion de zones). Etude systématique de l'influence des impuretés sur les propriétés spécifiques de ces métaux et leurs alliages. » [MIN, 1966b].

fer de très haute pureté ». En se concentrant sur un seul élément, le colloque est élargi à l'ensemble des propriétés « électriques, magnétiques, mécaniques, chimiques ». Le fer pur est alternativement envisagé comme une fin – « mettre en lumière les véritables propriétés du fer » – et un moyen – « étude de certains alliages » à usage industriel –.³⁰

Jusque vers 1970, la pureté reste considérée comme une garantie de l'identité élémentaire. Cette assimilation découle d'une identification des éléments à partir de « constantes » physiques, censées les déterminer. La caractérisation des composés par des constantes est d'ailleurs largement partagée tout au long du siècle. À partir de 1909, suite à une initiative de Charles Marie, des *Tables de constantes et données numériques* « de chimie, de physique, de biologie et de technologie » sont annuellement publiées au niveau international, sous le patronage du Conseil international d'unions scientifiques et du Conseil international de chimie. Au cours des années 1950 et 1960, Albert, Trombe, Wyart, Peychès et Bénard entre autres participent au comité national de direction de ces *Tables*. À l'époque, elles sont d'ailleurs soutenues par des industriels liés aux solides.³¹ L'identification d'un composé chimique (matière tridimensionnelle) à un ensemble de nombres (constantes physiques) reste largement répandue par la suite. Certains chimistes regrettent qu'une vision aussi simpliste soit, encore aujourd'hui, aussi ancrée dans les esprits.³² Au cours des années soixante, la question ne fait pas débat semble-t-il, en France, et de nombreux chimistes caractérisent des composés solides par des constantes. L'une des principales réalisations nationales de ce mouvement est éditée à partir de 1972 sous la forme d'un ouvrage monumental de trois tomes encyclopédiques : *Monographies sur les métaux de haute pureté*. Clairement métallurgique, le projet, dirigé par Chaudron [1972], qui décède d'ailleurs juste avant la parution du dernier tome en 1976, fait la démonstration de la puissance du CECM mais réussit aussi à être œcuménique en associant d'autres métallurgistes et des industriels français.³³

³⁰ « Le fer de très haute pureté. Propriétés physiques et chimiques. », 26-30 septembre 1966, Chaudron, « ayant pour but de mettre en lumière les véritables propriétés du fer, et plus particulièrement du fer de zone fondue qui s'est révélé un matériau d'un intérêt extrême en raison des propriétés nouvelles qu'il présente par comparaison avec les fers les plus purs utilisés jusqu'ici dans la recherche fondamentale [...] méthodes d'analyse des traces (par activation), les techniques de purification très poussée, les propriétés électriques, magnétiques, mécaniques, chimiques, les phénomènes de recristallisation et de polygonisation ainsi que les applications du fer très pur à l'étude de certains alliages (aciers inoxydables) [...] représentants de l'industrie métallurgique et des instituts de recherche étrangers » [RA CNRS, 1966, p. 63].

³¹ La Compagnie générale de télégraphie sans fil (« bienfaiteur ») et les « donateurs » : Euratom, Société La Radiotechnique, Rhône-Poulenc, Ugine-Kuhlmann, l'Union des industries chimiques soutiennent financièrement les Tables de constantes et données numériques.

³² « Pour moi, ce n'est qu'une impression mais il y a un certain nombre d'idées simplistes qui circulent : beaucoup de collègues croient par exemple qu'il existe une loi de Curie, or il n'y a jamais eu de loi de Curie et Van Vleck, qui a découvert le paramagnétisme, a écrit un grand article lui-même pour dire 'la loi de Curie n'existe pas'. Des collègues ignorent toujours qu'il y a cet article de Van Vleck. Apparemment il y a une droite mais c'est une approximation, si on va un peu plus loin, on s'aperçoit que la mesure expérimentale est en fait courbe et que ça s'explique très bien à condition d'utiliser tout l'arsenal mathématique réellement sophistiqué alors que pour la loi de Curie on détermine une constante de Curie en faisant une règle de trois, sauf que c'est une constante physique qui n'en est pas une et qui n'a pas de sens. Il y a encore beaucoup de gens attachés à cela car ils reviennent à cette idée que les matériaux sont caractérisés par des constantes numériques. » [I Caro, 2005, p. 7].

³³ Il serait tentant de croire que Chaudron a porté sur ses mandarinales épaules les métaux purs en France durant toute la période d'après-guerre. Cette hypothèse est infirmée ici par une large participation d'auteurs à l'ouvrage. Certes, la *Chaudronnerie* est majoritaire dans le projet : douze des vingt-deux chapitres ont été rédigés par des membres du CECM, Philippe Albert qui est désormais au Laboratoire Pierre Süe est l'un des anciens élèves de Chaudron. Pour les autres contributions, les auteurs sont variés : Annick Percheron et Jean-Claude Achard pour le chapitre des terres rares (LTR, Bellevue) ; F. Dabosi pour le thorium et l'uranium (Institut national polytechnique, Toulouse) ; P. Bussy sur le plutonium (Centre d'études nucléaires de Saclay) ; M.L. Jungfleisch, S. Tribalat sur le rhénium (Laboratoire de chimie physique la faculté des sciences de Paris) ; B. Dubois pour le

Après-coup, l'idée de purifier à l'extrême les métaux pour en extraire de nouvelles propriétés physiques paraît absurde.³⁴ Or, elle est défendue par l'un de ceux qui, en France, a très tôt étudié la non stœchiométrie. Faut-il y voir l'aveuglement d'un vieillard qui aurait entraîné à sa suite les métallurgistes français ? La purification correspond d'abord à l'exploration d'une nouvelle voie. Elle a montré que les propriétés des métaux purs – en particulier mécaniques – étaient médiocres. Mais elle a aussi permis l'obtention d'éléments de plus en plus purs, utilisés pour fabriquer d'autres matériaux – pas forcément purs –. Le mouvement se réclame en *Chaudronnerie* pour les éléments de transition de la même logique que la physique des semi-conducteurs (germanium et silicium) tournée vers la purification après-guerre. Ce n'est que dans un deuxième temps, lorsque les solides étaient purifiés que le dopage pouvait commencer. Devait-on et pouvait-on voir la purification des métaux (transition, terres rares) comme une impasse a priori ? L'historien répond non sans ambiguïté. Si elle a finalement été perçue comme une impasse, n'est-ce pas parce que le dogme des « propriétés » a vaincu ? Le jugement a posteriori suggère une double évolution. Premièrement, le paradigme de la « pureté élémentaire » n'a pas survécu à l'avènement d'une chimie « moderne », ancrée dans les propriétés physiques. Deuxièmement, l'étude des métaux et alliages, en particulier des métaux purs, a renforcé la croyance dans les bienfaits des « défauts », des « impuretés » qui sont valorisés au sein de la communauté parce que porteuses de propriétés, donc potentiellement utilisables dans les applications. C'est de ce mouvement qu'est issue la chimie du solide.

V.1.2.3. De la dissolution des hautes températures en chimie du solide (1964-1968).

Pour la France des années cinquante et soixante, les hautes températures ne sont pas incluses en chimie du solide. Elles en débordent par les thèmes abordés (métaux, métalloïdes), par les approches envisagées (mythe de la « pureté »), par les membres qui la composent (beaucoup d'industriels). Réciproquement, les chimistes du solide ne se revendiquent pas tous de la communauté des hautes températures.

Pour évaluer l'importance relative de la chimie des hautes températures vis-à-vis de la chimie du solide, j'ai suivi, dans un premier temps, les rapports d'activités et de conjoncture du CNRS pour la section chimie minérale. En 1964, le rapport de conjoncture précise : « Trois domaines dans lesquels les travaux français sont nombreux et importants et que la Commission a déjà placés au premier plan de ses préoccupations sont ceux de la *Chimie des Hautes Températures*, de la *Chimie du Solide* et de la *Chimie Métallurgique*. » [RC CNRS, 1964, p. 69]. À ce moment-là, la chimie des hautes températures est donc probablement considérée comme un domaine comparable à la chimie du solide et à la chimie métallurgique. Deux ans plus tard, en 1966, les rapports d'activité cessent de mentionner les commissions CNRS : la chimie des hautes températures et des réfractaires n'est donc plus référencée à partir de là [RA CNRS, 1965 ; 1966]. À partir de 1968, l'activité de la section chimie minérale est découpée en quatre catégories : 1°) coordination ; 2°) solvants et analytique ; 3°) métallurgie ; 4°) chimie de l'état solide [RA CNRS, 1968 ; 1969 ; 1971]. En quatre ans à peine, de 1964 à 1968, les travaux

zinc et le cadmium (ENSCP) ; des industriels aussi : J.P. Guerlet sur le palladium et le platine (Comptoir Lyon-Alemand, Louyot, Paris) ; P. de la Bretèque sur le gallium (Alusuisse-France).

³⁴ « Chaudron avait l'obsession du pur, ce qui est étrange parce que les corps purs ont en général des propriétés extrêmement médiocres : mou, pas résistant... Il faut mettre quelque chose dedans pour que ça aille mieux. Très vite, on s'est rendu compte que dans les tables de constantes, les propriétés des matériaux purs n'avaient pas d'intérêt parce qu'il fallait rajouter quelque chose dedans. A partir de là, ça n'en finissait pas, 1, 2, 3%... » [I Caro, 2005, p. 8].

sur les hautes températures se retrouvent ainsi intégrés à la métallurgie, à la chimie de l'état solide et aux solvants non aqueux. C'est justement le moment – à partir de 1966 – où les premiers laboratoires de chimie du solide sont associés au CNRS. Rares sont alors les laboratoires qui se réclament exclusivement des hautes températures. En regardant le cœur de la communauté des hautes températures, j'en dénombre seulement deux : le Groupe d'Odeillo (V.2) et le Centre de recherches sur la physique des hautes températures, créé à Orléans en 1969 (CRPHT) [CNRS, 1989].

Une évolution aussi rapide – si l'on croit les rapports institutionnels – interpelle l'historien. Il est tout d'abord probable que la lecture des rapports institutionnels surestime la rapidité et l'ampleur du phénomène. Par exemple, le succès de la *Revue des hautes températures et des réfractaires* est telle qu'elle devient internationale en 1966. De même, du 4 au 8 juillet 1966, la Société des hautes températures co-organise avec l'Association belge pour favoriser l'étude des verres et des composés siliceux un colloque sur « Les mécanismes de la fusion et de la solidification » [RA CNRS, 1966, p. 134]. Si ces deux initiatives prouvent que la communauté n'a pas encore disparu, elle souligne en revanche la réorganisation de son territoire. On cherche de nouveaux alliés internationaux.

Au sein de l'espace national, la chimie des hautes températures perd effectivement une partie de son importance au profit de la chimie du solide, alors en plein essor (III.3). Quatre éléments sous-tendent cette évolution. En terme quantitatif d'abord, on dénombre en 1960 une quarantaine de participants aux réunions de la Commission en salle des Actes (V.1.1.1) contre une trentaine de laboratoires en chimie de l'état solide. La taille des communautés en présence varie de un à dix au moins. Au niveau des personnes ensuite, c'est un moment de passation de pouvoir. Les deux grands mandarins des hautes températures disparaissent autour de 1960 : Lebeau décède en 1956 tandis que Chaudron, même s'il reste présent, prend sa retraite officielle en 1962. Inversement, la *Chrétienté*, avec Hagenmuller comme chef de file, entre de plein pied dans l'étude des solides. Elle n'a aucun intérêt social en chimie des hautes températures. Troisièmement, la période 1964-1968 correspond précisément au moment où la cristallogénèse devient le savoir-faire crucial pour les laboratoires de chimie du solide parce qu'elle les rend indispensables aux physiciens. En intégrant l'une des activités majeures des hautes températures dans sa matrice disciplinaire, la chimie du solide se dote d'un « dogme implicite »³⁵ et, ce faisant, dépossède la communauté des hautes températures d'une partie de sa raison d'être. Cet affaiblissement des hautes températures est d'autant plus important qu'il s'accompagne de la disparition d'un autre de ses piliers, la purification des solides, qui ne conduit qu'à des solides aux propriétés physiques pauvres (V.1.2.2). Enfin, le quatrième élément tient au système universitaire français : celui-ci maintient une organisation disciplinaire qui tend à défavoriser les régimes transversaux et organise chaque discipline par référence à la structure de la matière (chapitre II) plutôt qu'en se référant à une technique. Le champ technologique des hautes températures a peu de sens dans un système universitaire favorisant l'organisation disciplinaire et cognitive.

Au cours des années 1960, le domaine des hautes températures est démembré par la réorganisation de la chimie minérale. Peu visible dans un système universitaire disciplinaire, il intègre ses savoir-faire à la matrice disciplinaire de la chimie du solide. La communauté en perdant son intérêt épistémologique perd aussi sa population par migration. Si jusque-là ses membres se plaçaient résolument à l'intersection (entre état solide et hautes températures par

³⁵ Pourquoi parler de dogme « implicite » ici ? Si, lors de la définition de la matrice disciplinaire (III.2.2), le recours aux hautes températures n'est pas explicitement mentionné, il constitue, *de fait*, durant les années soixante et soixante-dix, la voie royale vers les monocristaux, favorisée par les potentats de la chimie du solide (VI.1.1).

exemple), ils vont avoir tendance désormais à se réclamer de la seule chimie du solide. En 1969, Flahaut se retire du secrétariat de la Commission pour « montrer l'exemple [à] Chaudron [qui] se cramponnait trop aux hautes températures » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 10] ; en 1976, Collongues abandonne la rédaction de la RIHTR [Collongues, 1979, p. 2] et Trombe prend sa retraite ; l'année suivante, Chaudron décède. La dernière œuvre commune a été l'édition d'un ouvrage de référence : *Les hautes températures et leurs utilisations en physique et chimie* en 1973 [Chaudron & Trombe, 1973]. Dans leurs notices respectives à la fin des années 1970, Flahaut se réclame désormais de la « chimie de l'état solide » et Collongues de la « chimie des matériaux ». La Commission et la Société s'arrêtent bientôt et la RIHTR disparaît en 1995. Rétrospectivement, la chimie des hautes températures peut être perçue comme un « tremplin » du point de vue de la chimie du solide.³⁶ Considérée au même niveau que la chimie de l'état solide durant les années cinquante, la chimie des hautes températures s'est dissoute (en partie) dans la chimie du solide au cours de la décennie suivante. Un flux migratoire positif a enrichi le second tandis qu'il appauvissait le premier. De deux centres sociaux et cognitifs équivalents – hautes températures et état solide –, on est passé en une dizaine d'années seulement à un centre plus puissant – la chimie du solide – et une périphérie – réduite à la portion congrue du cognitif –. Cette perspective légitime le point de vue du vainqueur social. Plus probablement, une partie de la communauté des hautes températures s'est dissoute dans la chimie du solide – permettant la cristallogénèse – et l'autre partie a disparu de l'horizon des solidistes.

Pour s'en convaincre, on peut suivre la trajectoire d'un laboratoire des hautes températures au cours des années 1950-1980. En restant focalisé sur un laboratoire, l'historien opère ce que les physiciens appellent un changement de référentiel : le repère fixe n'est plus la communauté par rapport à laquelle se meuvent les acteurs (chapitres III et IV) mais le laboratoire lui-même par rapport auquel se meuvent les communautés. Ce changement de référentiel permet d'inverser l'interprétation historique.

V.2. Trajectoire des fours solaires d'Odeillo : une aventure scientifique originale et stratégique

Au début des années 1930, à l'École de chimie de Paris, Georges Urbain a lancé Trombe sur l'étude des terres rares. Durant sa thèse, cet élève de la promotion 1928 utilise des fours pour produire la « température élevée que nécessite l'isolement des métaux rares à l'état fondu » [Trombe, 1936, chapitre I]. Après-guerre, lorsqu'il se retrouve à la tête du Laboratoire des terres rares à Bellevue (LTR), Trombe rejoint la Commission des hautes températures et des réfractaires du CNRS dont il devient rapidement secrétaire. Entre-temps, il a pensé utiliser l'énergie solaire pour produire de hautes températures.³⁷ L'idée n'est pas nouvelle. Déjà, à la fin du dix-septième siècle, la lumière* solaire a été utilisée pour effectuer des combustions sans addition de carbone. Pour cela on focalisait la lumière solaire avec un miroir concave puis avec des lentilles biconvexes. Wilhelm Homberg en particulier cherche par ce moyen à percer les secrets de l'or et de l'argent. Durant la première moitié du dix-huitième siècle,

³⁶ « JR : Ça [la chimie des hautes températures] a été un peu un tremplin pour propulser la chimie du solide. – JF : C'est ça mais je n'ai pas l'impression qu'il existe aujourd'hui, en France, un laboratoire de chimie des hautes températures. Tous l'utilisent en synthèse mais il n'y a pas de laboratoire dévoué uniquement à cette question. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 10].

³⁷ Trombe « désirait obtenir des quantités industrielles de terres rares et pour ce faire il fallait travailler à haute température. Il avait pensé à un four solaire. » [I Caro, 2005, p. 3].

Étienne François Goeffroy poursuit dans cette voie en multipliant les métaux testés. Pour réaliser ses expériences, il utilise la lentille dite du Régent. À la fin du siècle, cette lentille est ressortie du placard de l'Académie royale des sciences pour des expériences en série, à la façon Lavoisier, auxquelles participent collectivement Pierre Joseph Macquer, Cadet Brisson et Antoine-Laurent Lavoisier.³⁸

Trombe remet donc la vieille idée à neuf à l'observatoire de Meudon, à la limite du campus de Bellevue, où il fait construire « un petit four solaire expérimental » grâce à l'appui du CNRS et des observatoires de Meudon et Paris.³⁹ Des anciens miroirs de DCA sont récupérés puis utilisés. Trop accaparé par le transfert du Laboratoire des terres rares de la Montagne Sainte Geneviève à Bellevue, il n'a pas le temps de s'occuper du projet. Il en confie la gestion quotidienne à Marc Foëx, son ancien camarade de Chimie Paris (promotion 1932), devenu son collaborateur à la mort d'Urbain. Trombe reste néanmoins maître d'œuvre. Durant trois ans, de 1946 à 1949, Trombe, Foëx et Charlotte Henry La Blanchetais vont poursuivre des travaux de « chimie physique » utilisant de manière originale l'énergie solaire comme source de hautes températures.⁴⁰

V.2.1. Le groupe d'Odeillo-Montlouis : l'énergie solaire entre recherche fondamentale, applications civiles et militaires (1950-1972).

V.2.1.1. L'euphorie des années cinquante à Montlouis : réfractaires, enjeux militaires et coloniaux.

Les recherches sur l'utilisation de l'énergie solaire auraient pu continuer paisibles et recluses à l'observatoire de Meudon. Mais Trombe s'adonne aussi à la spéléologie, activité peu courue à l'époque. À cette occasion, il a fait la connaissance du « colonel Bergeron » à qui il parle de l'installation rudimentaire de Meudon et du manque d'ensoleillement de la région parisienne. « Responsable de la recherche scientifique militaire » [*L'Indépendant*, 1976], Bergeron est intéressé par le sujet qu'il juge stratégique et visite l'installation de Meudon. Séduit par l'originalité du projet, l'esprit aventurier de l'équipe et la personnalité du « *condottiere* », Bergeron propose une solution aux scientifiques. Si, en région parisienne, le ciel est trop souvent voilé, voire pluvieux, au sud en revanche, le territoire national dispose d'un ensoleillement propice. Or l'Armée dispose de deux forts qu'elle pourrait mettre à disposition du CNRS pour de telles expériences : le fort de Cimiez près de Nice et la citadelle de Montlouis dans la commune d'Odeillo, à deux pas de Font Romeu (Pyrénées Orientales). C'est finalement ce dernier site qui sera choisi. Les raisons invoquées sont diverses : attachement de Trombe à la région puisqu'il y a grandi (Ganties en Haute Garonne) ;

³⁸ Ces informations sur les dix-septième et dix-huitième siècles proviennent d'une amicale contribution de Christine Lehman.

³⁹ En 1947, le CNRS fournit à Trombe une « aide individuelle » de 200 000 francs (soit dix mille euros 2006) « pour l'aménag. d'un labo solaire à l'Obs. Meudon. » [RA CNRS, 1947].

⁴⁰ « En 1946, le [CNRS] et les Observatoires de Paris et de Meudon apportaient leur appui à la création d'un petit four solaire expérimental, situé à l'Observatoire de Meudon. Trois ans de recherches avec Marc Foëx et Charlotte Henry La Blanchetais nous ont montré toutes les possibilités qu'apporte, pour la recherche fondamentale, le four solaire, nouvelle méthode de production des hautes températures. » [Trombe, 1961]. À la rubrique « chimie générale – chimie physique » du Bulletin du CNRS de mai 1949, Foëx apparaît pour son travail sur l'« Utilisation de l'énergie solaire pour la production de très hautes températures (chargé de recherches, Hautes températures, ENSCP) » [CNRS, 1949b].

ensoleillement exceptionnel de la vallée d'Odeillo, la Cerdagne ; vision romantique de ce site isolé dans la montagne et plus proche du soleil à 1500 mètres d'altitude...⁴¹

En un an à peine, l'idée initiale fait son chemin sur le papier et s'incarne en un « Laboratoire de recherches sur l'utilisation de l'énergie solaire » rattaché au CNRS comme « laboratoire extérieur ». Fin 1951, à la citadelle de Montlouis, « les constructions se terminent dans des conditions satisfaisantes. » C'est « la Direction des Poudres [qui] a pris à sa charge la plus grande partie des dépenses d'installation » [RA CNRS, 1951]. Le colonel a su se montrer persuasif auprès du « ministère de la Guerre » [L'Indépendant, 1976] quant à l'importance stratégique de l'énergie solaire. De son côté, la petite équipe de chercheurs a su convaincre, par ses résultats récents, son organisme de tutelle, le CNRS. Grâce à l'entregent de Trombe, elle dispose en outre de l'appui de plusieurs académiciens qui argumentent la valeur scientifique du projet. Concrètement, Montlouis doit abriter deux types d'installation : de petits fours solaires semblables à celui de Meudon d'une puissance variant de 1,5 à 2 kilowatts (kW) utilisant des miroirs de deux mètres de diamètre ; deux prototypes de fours plus gros d'une puissance de 80 et 100 kW et de diamètre de miroirs proche de neuf mètres. À terme, après une phase d'essai, ces prototypes pourraient devenir des « machines industrielles ».⁴² Dès son acte de naissance, le Laboratoire est marqué par une double orientation : fondamentale et appliquée.

À sa création, en 1950, le Laboratoire de recherches sur l'utilisation de l'énergie solaire est dirigé par Trombe, Foëx étant son adjoint et Henry La Blanchetais occupant le poste de « régisseur » [RA LES, 1974, p. 1]. Par la suite (1957), l'entité propre du CNRS sera renommé Laboratoire de l'énergie solaire (LES), appellation que j'utiliserai désormais. Que ce soit au niveau scientifique ou au niveau pratique, il soulève de grands espoirs. Très rapidement cependant, les prévisions initiales sont modifiées. La réalisation des fours à 80 et 100 kW est abandonnée au profit de « la mise en marche [d'un] four solaire semi-industriel de 75 kW muni d'un miroir de 12 mètres de diamètre ». Installé en janvier 1952, celui-ci a passé son premier hiver en montagne et bien résisté entre « neige et vent ». D'autre part, « quatre

⁴¹ « C'était un *condottiere* Trombe, un aventurier, un gentilhomme. » [I Caro, 2005, p. 11]. « Trombe était un beau parleur. J'étais copain de Trombe. C'était plus un philosophe qu'un scientifique [...] son laboratoire d'Odeillo [était] à 1500 mètres d'altitude, dans les Pyrénées, la route était mauvaise. Maintenant, c'est mieux, Font-Romeu est devenu un centre touristique. » [I Hagenmuller, 2004, p. 9]. « En 1949, une visite à Meudon du Général Bergeron provoqua une large extension de nos moyens et de nos perspectives de travail. [...] il y a donc près de dix ans, une partie de la citadelle de Montlouis, située dans une des régions les plus claires de France, la Cerdagne, était mise à la disposition des chercheurs du CNRS. » [Trombe, 1961]. « C'est grâce à la spéléologie qu'il a pu installer un four solaire dans les Pyrénées. Il explorait une grotte dans le Lot avec l'armée, plus précisément avec le Colonel Bergeron, devenu Général plus tard, et au cours de l'expédition d'exploration, comme ils étaient assis dans l'eau - ce qui arrive souvent - Trombe racontait à Bergeron qu'il cherchait un endroit ensoleillé pour installer un four solaire. Les miroirs de DCA à Meudon ne suffisaient pas étant donné la fréquence des nuages en région parisienne. Alors le colonel lui a dit : l'armée peut mettre à votre disposition un fort dans une région bien ensoleillée. Il y en a un à Nice, un à Montlouis (en Cerdagne). Entre le fort de Cimiez à Nice et celui de Montlouis, Trombe, qui était pyrénéen, a choisi Montlouis. C'était probablement une erreur stratégique pour la suite car Nice a plus de prestige et Montlouis est très isolé. » [I Caro, 2002, p. 3].

⁴² « Des membres de l'Académie des sciences, Messieurs Cotton, Danjon, Hackspill, Jolibois, Lebeau, Mauguin, Maurain, Pascal, Pérès, Portevin, Ribaud, apportèrent leur caution scientifique à nos projets sous la forme d'une motion [Trombe, 1961]. « En 1949, les résultats obtenus à Meudon ont provoqué la mise à la disposition du CNRS, par le Ministère des Armées, d'une partie de la citadelle de Montlouis, en haute Cerdagne, région particulièrement ensoleillée. L'objectif était de poursuivre des essais avec divers fours solaires de petite puissance (1,5 à 2 kW) et de réaliser des prototypes de fours solaires plus puissants pouvant devenir éventuellement des machines industrielles. » [RA LES, 1974, p. 1]. « Il fallait, pour construire les machines prototypes dont nous avions proposé la réalisation et pour aménager la citadelle, d'importants crédits. Ils étaient demandés, non seulement au CNRS, mais aussi à la Défense Nationale. » [Trombe, 1961]. « Une installation à l'échelle semi-industrielle est pratiquement terminée : elle comporte un four solaire de 80 à 100 kW [...] de 9 mètres » de diamètre [RA CNRS, 1951, p. 11].

nouvelles installations à axe vertical, de 3 kW chacune, sont en cours de montage. » [RA CNRS, 1952, p. 34-35]. Les deux types de four – grands et petits – permettent de produire de très hautes températures, ce qui place le Laboratoire au sein de la communauté de chimie des hautes températures (V.1.1).

Son activité s'oriente selon deux axes bien distincts. Premièrement, à l'instar des tenants de la chimie de l'état solide et des hautes températures, le Laboratoire place les composés minéraux solides au cœur de son programme de recherche. Ce sont les solides « réfractaires » et « ultra-réfractaires » sur lesquels se concentre la plupart des efforts au cours des années 1950. On distingue un intérêt : 1°) pour les composés des terres rares parce que Odeillo est lié par un directeur commun au LTR (IV.2.) ;⁴³ 2°) pour les oxydes réfractaires comme la zircone ou le corindon, ce qui le met en concurrence/collaboration avec le groupe Collongues au CECM (IV.3.) ; enfin, 3°) dans une moindre mesure pour les sulfures métalliques, ce qui le rapproche du Laboratoire Picon-Flahaut (IV.1.). Dès 1953, le rapport d'activité mentionne une activité en cristallogenèse avec la synthèse de monocristaux de « spinelle* de magnésie » mais aussi en synthèse de solides amorphes. Le Laboratoire présente donc une activité « élémentaire » très éclectique pour l'étude des solides. Cependant il se distingue des autres laboratoires universitaires rencontrés par son aptitude à traiter (synthétiser ou séparer) des quantités très variées de produit : du gramme dans les petits fours à plusieurs centaines de kilogrammes dans le four de 75 kW. Ce faisant, sa capacité relève à la fois du laboratoire de recherche universitaire et du centre d'essai à échelle semi-industrielle.⁴⁴ Un tel choix rappelle d'une part le projet du maître, Urbain, de créer un Laboratoire des gros traitements chimiques pour les terres rares en 1937 (II.2.1.4) et d'autre part, la coopération institutionnelle, originale en France, entre le CNRS et le Laboratoire des poudres qui a permis sa fondation et assure son fonctionnement. La première activité du Laboratoire de l'énergie solaire, considérée comme scientifique, procède simultanément d'enjeux fondamentaux – publier dans les revues nationales ou internationales reconnues – et de logiques appliquées – répondre aux demandes des militaires, du CEA pour la « zircone stabilisée » ou d'industriels de la céramique pour la fabrication d'« alumine » au four solaire [RA CNRS, 1957, p. 95] –. Parmi les principaux brevets pris par le CNRS en 1957 figure celui de Trombe sur l'« application de l'énergie solaire à l'obtention de produits chimiques purs » [RA CNRS, 1957, p. 15]. Ce type de recherche pourrait tout à fait s'inscrire dans le modèle organique de la « triple hélice » : université, industrie et gouvernement [Etzkowitz & Leydesdorff, 1998], l'industrie étant ici plutôt publique que privée. Il répond aussi au double rôle confié au CNRS de mener des « études et recherches présentant pour l'avancement de la science ou l'économie nationale un intérêt reconnu » [CNRS, 1947, p. 4].

La deuxième activité du Laboratoire, plus technologique, vise à la « réalisation de prototypes » [RA CNRS, 1957, p. 95]. Chercheurs et techniciens y travaillent de concert. Au tout

⁴³ « PT : Y avait-il des liens entre les diverses entités de Mont-Louis et de Bellevue ? – PC : Oui, il y avait des interactions entre Mont-Louis-Odeillo et Bellevue. Par exemple, j'ai moi-même travaillé dans les deux entités. » [I Caro, 2005, p. 3].

⁴⁴ Le rapport d'activité du CNRS précise les travaux suivants pour l'année 1953 :

« 1°) à l'aide de petites installations, (miroir de 2 mètres) :

- des attaques et traitements de minerais : zircon, béryl, minerais de terres rares ;
- la préparation d'oxydes d'uranium de forte densité et de sulfures de terres rares ;
- l'étude de l'effet de rayonnement concentré sur les substances inflammables de combustibles ;
- celle de la répartition de la chaleur dans les fours de différentes formes (influences respectives du rayonnement, de la convection et de la conduction), études applicables aux installations futures comme actuelles.

2°) à l'aide de la grande installation (miroir de 12m) il a été possible d'effectuer en particulier :

- le frittage de la zircone 'stabilisée' (500kg) et d'oxydes de thorium ;
- la fusion de verre de silice opaque ou transparent ;
- la purification d'oxydes réfractaires (corindon) ;
- la préparation de monocristaux (spinelle de magnésie). » [RA CNRS, 1953].

début du projet ce sont pour la plupart des prototypes de four solaire. Leur mise au point est délicate parce qu'ils associent deux types de miroir. Deux « miroirs focalisateurs » paraboliques (de forme parabolicoïde) servent à focaliser la lumière solaire tandis que des « miroirs orienteurs », plus petits, ont pour rôle d'optimiser l'orientation des miroirs focalisateurs vis-à-vis de la position du soleil dans le ciel [RA CNRS, 1951, p. 11]. Comme l'astre solaire balaie 180° de son lever à son coucher, il faut réaliser un « asservissement » dynamique du four solaire pour qu'il suive la course solaire. De nombreux essais sont nécessaires ; les chercheurs et techniciens d'Odeillo se spécialisent alors en automatique, en électronique [RA CNRS, 1957, p. 96]. S'ils ne fabriquent probablement pas eux-mêmes les miroirs, ils doivent en revanche réfléchir à la courbure ou la forme optimale. Au cours de l'année 1954, un simple changement de miroir permet d'augmenter le rendement d'un petit four de 50 à 70%.⁴⁵ Ce travail de mise au point technologique servira par la suite dans le cas des fours à image, développés entre autres par Collongues au cours des années 1960 (IV.3.1.3).⁴⁶ Il permet surtout de disposer, par concentration de rayonnement, d'un outil de choix pour atteindre de manière plus ou moins contrôlées des températures fantastiques : plusieurs milliers de degrés Celsius !

L'équipe d'Odeillo s'est aussi lancée dans une autre aventure : la « domotique solaire » [I Caro, 2005, p. 3] à température ambiante. Mettre au point des prototypes de climatisation pour les maisons, systèmes de chauffage de l'air ou de réfrigération de l'eau mais aussi développer la culture sous serre tels sont les grandes lignes du projet. Dans cette affaire, ce n'est plus la Défense nationale qui pousse mais la France coloniale qui finance les projets au début des années 1950. L'Algérie et le Maroc, sous domination française, regorgent de soleil et manquent de climatisation ou de glace. Cinquante ans plus tard et après quelques guerres de décolonisation, le ton des rapports semble paternaliste : c'est un devoir pour la France d'industrialiser des « territoires déshérités » (qu'elle a elle-même colonisés par le feu et le sang).⁴⁷ Dès 1957, le rapport d'activité du CNRS indique trois réalisations prometteuses : un « prototype réfrigérateur produit 90kg de glace par jour » avec un prix de revient de sept francs le kilogramme (soit douze centimes d'euro 2006). Le rapport estime que le prix de revient doit encore baisser de 30 à 40% pour que le procédé devienne rentable. Deuxièmement, de manière très intelligente, l'équipe chauffe une partie de ses locaux dans la citadelle pour tester la viabilité du projet (et économiser de l'énergie). Avec l'énergie solaire, le prix de revient du kilowatt-heure est de 0,75 franc (soit 1,3 centime d'euro 2006). Enfin, on fait construire des « maisons prototypes »⁴⁸ à Montlouis pour tester grandeur nature différents paramètres⁴⁹ : chauffage par « rayonnement solaire [de] matériaux » (qui absorbent l'énergie

⁴⁵ « Amélioration des appareils et construction d'appareils nouveaux. Les glaces du miroir orienteur de la grande installation ont été changées. Les nouvelles glaces, de meilleure planéité, ont permis de réaliser un gain substantiel dans la concentration de l'énergie solaire. L'énergie récoltée dans une ouverture de 10 cms de diamètre, qui était précédemment de 50% de l'énergie totale, est passée à 70%. Le miroir parabolique a été également amélioré par quelques réglages supplémentaires. » [RA CNRS, 1954].

⁴⁶ « Dans la période 1952-1964, les recherches poursuivies à Montlouis sur fours solaires [...] ont servi de base au développement actuel des fours solaires et des fours à image pour la recherche fondamentale » [RA LES, 1974, p. 1].

⁴⁷ « Le Gouvernement Général de l'Algérie, ainsi que le Maroc, qui s'intéressent vivement à l'exploitation de l'Energie Solaire, ont, de leur côté, fourni des crédits. » [RA CNRS, 1951, p. 11]. « le laboratoire de recherches sur l'utilisation de l'Energie Solaire (Montlouis) dont les travaux permettront de résoudre certains problèmes très actuels concernant l'équipement industriel des territoires déshérités. » [RA CNRS, 1952, p. 19].

⁴⁸ « Trombe était un précurseur. Incidemment, on peut dire que dans les années 1950-55, il a inventé toute l'énergie solaire dont on parlera bien plus tard : le chauffage solaire et toute la domotique solaire en fait. Sur les terrains de Montlouis, il avait mis au point des prototypes pour de telles maisons. » [I Caro, 2005, p. 3].

⁴⁹ « Un prototype réfrigérateur donnant 90 kg de glace par jour a été réalisé. Le prix de la glace, avec ce prototype est de 7 francs le kg. Il est un peu trop élevé pour que l'on puisse envisager sa réalisation commerciale. Il sera nécessaire d'abaisser son prix de revient de 30 à 40%. Les recherches sont poursuivies dans ce sens. [...]

solaire sans la rayonner), par « effet de serre et captage sélectif de l'air chaud » ; « refroidissement de diverses surfaces par leur rayonnement propre sur l'espace et le captage sélectif de l'air froid produit à leur contact », etc. [RA CNRS, 1959, p. 139] À partir de 1958, une nouvelle maison prototype « climatisée par refroidissement à l'aide du rayonnement nocturne » est installée à Colomb-Béchar, dans le désert saharien, avec « la collaboration du Comité d'action scientifique de la Défense nationale » [RA CNRS, 1958, p. 107].

Pour résumer, le Laboratoire de l'énergie solaire concrétise une idée audacieuse remise au goût du jour par Trombe : utiliser l'énergie solaire soit pour produire de très hautes températures par focalisation du rayonnement, soit pour développer une climatisation domestique en jouant sur les échanges thermiques. À deux échelles de température différentes – plusieurs milliers de degrés ou température ambiante –, l'équipe d'Odeillo s'enthousiasme pour la mise au point de prototypes originaux. Ce faisant, les chercheurs et techniciens apprennent un nouveau métier qui de la recherche expérimentale les conduit vers la normalisation instrumentale. C'est un exemple typique de communauté « interstitielle » utilisant des savoir-faire en chimie, météorologie, hautes températures, automatique. Le groupe Trombe s'efforce de fabriquer des « appareils génériques » pour la recherche fondamentale avec l'idée d'une utilisation plus large en établissant un ensemble de règles de fonctionnement (« métrologie »). En réunissant ces trois aspects – interstitiel, générique, métrologique –, le Laboratoire d'Odeillo, malgré une implantation institutionnelle au CNRS, s'apparente ainsi à ce que Shinn [1997] a formalisé sous l'appellation de communauté de « *research-technology* ».

Par leurs relations de confiance et d'amitié, Trombe et Bergeron constituent la cheville ouvrière de l'affaire dans la mesure où chacun dispose de l'oreille attentive de son administration – le CNRS et l'Armée – et la convainc de l'intérêt stratégique des recherches utilisant l'énergie solaire. Pour l'installation du Laboratoire, le ministère de la Guerre fournit locaux, moyens et argent sans compter. Dès la mise au point terminée, le Laboratoire des poudres utilise les capacités de Montlouis comme laboratoire d'essais pour réaliser des « chocs thermiques sur divers matériaux ». D'autres organismes d'État rejoignent bientôt le duo CNRS-Armée comme bailleurs de fonds : l'administration des colonies en Afrique du Nord qui s'intéresse aux potentialités de l'énergie solaire dans le Sahara pour la climatisation des maisons puis le CEA qui fait effectuer la « fusion d'oxyde d'uranium » en 1960 [RA CNRS, 1960, p. 145]. Cette aventure scientifique suscite aussi un très vif intérêt au sein de la communauté nationale de chimie de l'état solide. Deux événements l'attestent en 1958. Foëx, l'un des principaux protagonistes des recherches sur l'énergie solaire, reçoit la première médaille Lebeau décernée par la Commission des hautes températures (V.1.1). C'est le site de Montlouis qui est choisi pour organiser en juin 1958 un colloque international du CNRS portant sur les « Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie » [CNRS, 1961]. Le directeur honoraire du CNRS, Gaston Dupouy, l'homme de la microscopie électronique française à Toulouse, ouvre le colloque par une allocution dithyrambique sur le projet des fours solaires.

Ce colloque du CNRS est le troisième d'un cycle de congrès de l'énergie solaire qui a commencé à New Delhi en 1954 pour se poursuivre à Phoenix deux ans plus tard. Il met en évidence un fort intérêt des États-Unis pour l'énergie solaire, qui est désormais considérée

Des prototypes de chauffage solaire ont été réalisés pour chauffer les locaux de la Citadelle, les laboratoires et une partie des locaux administratifs et d'habitation sont chauffés par ce moyen. Plus de 100m² de récupérateurs ont été installés. Le prix de revient du kilowatt-heure (équivalent à 860 calories) peut être chiffré à 0,75 F. Des petites maisons prototypes sont en construction à Montlouis » [RA CNRS, 1957, p. 95-96].

comme stratégique par le département américain de la Défense. Avec quelques années de retard sur la France, les États-Unis construisent leur premier four solaire en 1959.⁵⁰

V.2.1.2. Le projet pharaonique des années soixante : le four solaire à 1000kW

Au début des années cinquante, l'un des objectifs avoués du Laboratoire de l'énergie solaire est le changement d'échelle. Certes le four de 75kW est une réalisation technologique qui permet des essais semi-industriels satisfaisants. Il ne constitue pourtant qu'un premier pas vers des prototypes beaucoup plus puissants. Suivant les prévisions de l'équipe, augmenter la taille des miroirs conduira à une démultiplication de la puissance sans nécessiter de réglages supplémentaires. Au contraire, la perfection des miroirs (courbure, taille des défauts...) est d'autant moins cruciale que les miroirs sont plus grands. Le changement d'échelle envisagé devrait donc s'effectuer sans difficulté technique nouvelle.⁵¹ La frénésie des acteurs de Montlouis est telle qu'à peine le four de 75kW opérationnel on envisage déjà un four quinze fois plus puissant à mille kilowatts. Dès 1954, on travaille aux « fragments de miroirs convergents de l'installation de 1000 KWA » [RA CNRS, 1954, p. 43-44]. En 1957, le CNRS acquiert un vaste terrain à Font-Romeu à huit kilomètres de Montlouis pour construire le nouveau four [RA CNRS, 1957, p. 22]. En 1961, Trombe présente le projet de four solaire devant la Société chimique de France. Un bâtiment de 45 mètres de haut et huit étages doit supporter un « miroir parabolique de 2000m² », soit quarante mètres de haut pour cinquante mètres de large environ [RA CNRS, 1962, p. 331 ; 1964, p. 396]. Trombe estime que l'installation fournira « en calories à haute température, l'équivalent de 1000 kW, pendant 7 à 8 h par jour » [Trombe, 1961b].

Le chantier débute le 23 octobre 1961 par des travaux de terrassement du terrain acquis par le CNRS à Font-Romeu. Par ses dimensions gigantesques, sa forme originale et son caractère stratégique, la construction du four solaire de 1000 kW relève de l'« intérêt national ». Elle implique plusieurs corps de l'État ainsi que de nombreux entrepreneurs privés. En mars 1966, à Font-Romeu, un intéressant colloque réunit la plupart des acteurs de la construction du four solaire. Le compte-rendu des discours qui y sont présentés permet de repérer les attributions de chacun [CNRS, 1966]. L'Aéroport de Paris (ADP), sollicité par le CNRS, a accepté d'être « maître d'œuvre » du chantier, H. Vicariot, « ingénieur en chef » d'ADP, en assurant la direction. Être maître d'œuvre signifie coordonner les interventions de chacun des sous-traitants. L'Aéroport de Paris est intervenu pour les quatre principales étapes du projet. Premièrement, il a procédé à une « étude architecturale » préalable décidant de la forme du futur bâtiment supportant le four solaire. Il a alors fallu concilier des exigences scientifiques et techniques (prédéfinies par l'équipe de Montlouis) avec des considérations d'ingénierie (mécaniques) et d'esthétique. Cette première étape est intimement couplée aux « études techniques » réalisées par le « bureau d'études STUP ». M. Courtot, « ingénieur-

⁵⁰ « Du 23 au 28 juin 1958 se tient à Montlouis le colloque international du CNRS sur les « applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie » (les précédents *symposia* ont eu lieu à Phœnix en Arizona en 1956 et à New Delhi en 1954). Ce colloque à Montlouis a favorisé les rencontres avec les États-Unis qui construisent un four solaire en 1959. » [Demanée M., 1989, p. 80].

⁵¹ « Cette installation [75kW] qui fonctionne de manière satisfaisante, est le prototype d'installations beaucoup plus puissantes car l'augmentation ultérieure des dimensions de l'appareil actuel jouera automatiquement en faveur de la perfection du paraboloïde, sans qu'il y ait à envisager de mises au point nouvelles. » [RA CNRS, 1952, p. 34].

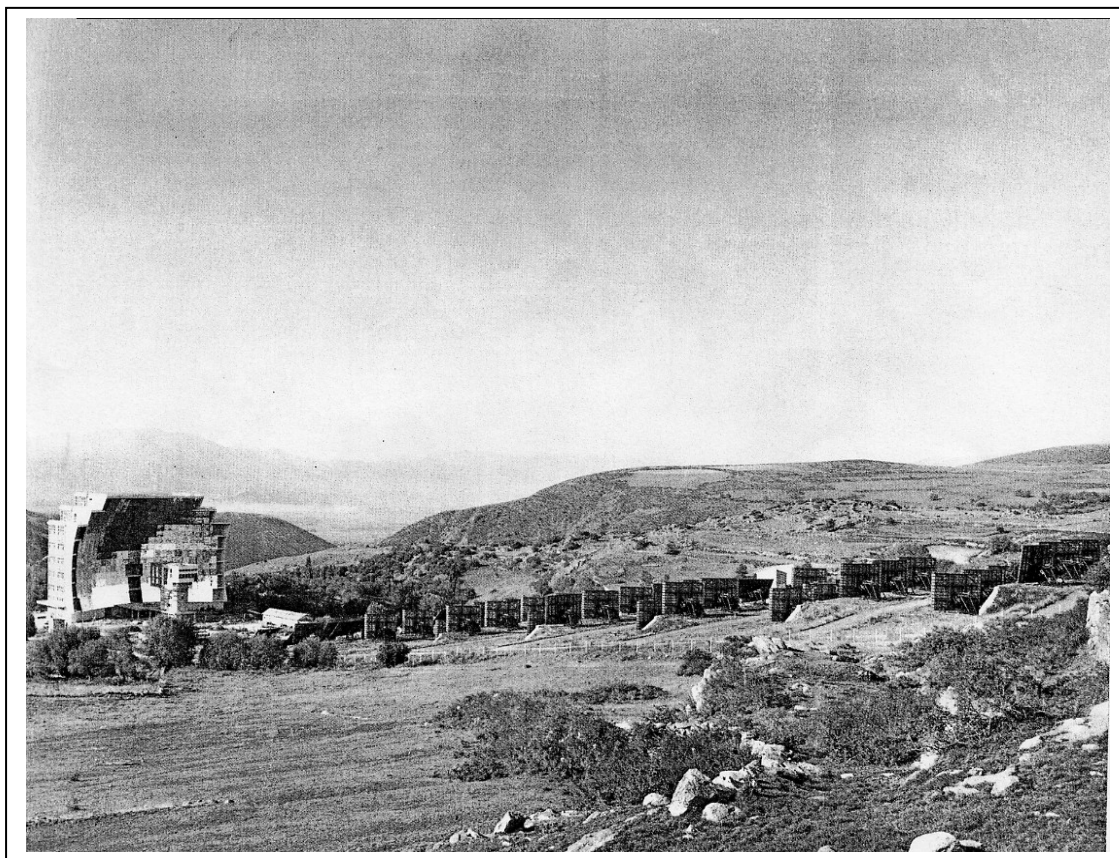
conseil » de la STUP, raconte comment les ingénieurs de son équipe ont fait le choix d'une « ossature en béton précontraint » pour assurer une stabilité de l'édifice face aux conditions extérieures exceptionnelles que sont le vent fort en montagne et les chocs thermiques induits par le fonctionnement du four. Au cours de la troisième étape, ADP a préparé les « marchés » et lancé les appels d'offres publics pour choisir les divers sous-traitants. Enfin, en partenariat avec le « service des Ponts et Chaussées des Pyrénées Orientales » (M. Sarda), il a supervisé le déroulement des travaux proprement dits. Au quotidien, c'est le « conducteur des travaux », M. Paquet, qui dirige les ouvriers du bâtiment de l'entreprise Fondeville (Perpignan) et de l'EITP (Paris) pour le « gros œuvre », la « maçonnerie » et les « revêtements des sols ». Au cours de la construction d'autres petites et moyennes entreprises interviennent sur des points spécifiques : SCAN (La Rochelle) pour les « murs-rideaux chauffants », Électrification générale de Toulouse pour l'électricité, OTIS (Paris) pour les « ascenseurs » et « monte-charge », FAU (Prades) pour les « balustrades extérieures », Quinta (Perpignan) pour la « serrurerie et rampes intérieures », SIKA (Paris) pour l'« étanchéité » [CNRS, 1966].

Fin 1962, les fondations du bâtiment principal ont été achevées avec des « précautions particulières », la construction a atteint le rez-de-chaussée. Face à lui, les « huit terrasses et le quadrillage de béton supportant les dispositifs orienteurs sont complètement terminés ». Un terrain adjacent est en cours d'acquisition par le CNRS [RA CNRS, 1962, p. 26, 331]. En septembre 1963, on commence à installer les « premières machines » sur les terrasses. En octobre, le bâtiment avec six premiers étages s'élève déjà à trente-cinq mètres de hauteur [RA CNRS, 1964, p. 396]. Deux ans et demi pour terminer le gros œuvre, probablement au début de l'année 1964. Il en faudra encore quatre pour achever les « constructions » du four solaire d'Odeillo Font-Romeu [RA CNRS, 1968, p. 72] : finir le bâtiment proprement dit, poser les plaques du miroir principal et aménager l'ensemble du terrasses qui font face au miroir principal.

C'est surtout la mise au point de l'ensemble des éléments qui se révèle de la prouesse en automatique. Pas moins de soixante-trois miroirs orienteurs, disposés sur les terrasses face au bâtiment, doivent orienter la lumière du soleil vers le miroir principal, qui la focalisera sur une surface étroite. Pour une utilisation optimale du four, les miroirs orienteurs doivent être asservis convenablement. Des problèmes d'électronique se posent. Durant toute l'année 1968, des sociétés spécialisées comme Saint-Gobain-Techniques nouvelles et Thomson-automatisme louent leurs services pour tenter de les résoudre. En vain. Ce sont finalement les techniciens du LES, sous la direction de A. Le Phat Vinh, qui viennent à bout de l'asservissement. Fin janvier 1969, « l'orientation du faisceau réfléchi » est suffisante. Le 31, on mène une étude thermique et optique de la « tâche focale donnée par l'ensemble » – la température maximale dépassant les 3000°C – et on peut « procéder à un premier essai de fusion de plaques d'acier ». Excédés par l'incompétence des sous-traitants et le dirigisme de la direction du CNRS (qui ne laisse aucune marge pour choisir les sous-traitants), Trombe et ses collaborateurs parviennent finalement à prendre en main le réglage technique des orienteurs et du paraboloïde par la suite.⁵² Dans son historique de 1974, Trombe souligne le

⁵² « Pendant toute l'année 1968, malgré des efforts très louables de la Société Saint-Gobain-Techniques nouvelles, et de très nombreux rappels à la Société Thomson-automatisme sous-adjudicataire, il n'a pas été possible d'obtenir un asservissement correct de l'ensemble des 63 orienteurs du four solaire de 1000 kW. Divers techniciens du [LES], sous la direction de Monsieur Le Phat Vinh, ont examiné et testé les circuits électroniques et il est apparu finalement, comme l'a montré Monsieur Le Phat Vinh, que les inversions de commandes constatées étaient dues à une alimentation générale insuffisante. La réparation de cette erreur assez grossière a demandé plusieurs mois et c'est seulement fin Janvier 1969 que l'ensemble des 63 orienteurs a pu fonctionner correctement. Actuellement l'orientation du faisceau réfléchi est tout à fait satisfaisante et la poursuite du soleil pour chaque appareil se fait à une minute d'arc près. Le mouvement lent est donc irréprochable et la précision de l'orientation est très supérieure à celle que l'on peut obtenir des glaces elles-mêmes. Signalons que le mouvement rapide (mise en route) on constate encore pour quelques appareils, des collages d'électrovannes qu'il

rôle important joué par Albert Le Phat Vinh (ingénieur 1A), C. Royere et J.F. Laurent (ingénieurs 2A) ainsi qu'une « grande partie du personnel du laboratoire » [RA LES, 1974, p. 3]. Le résultat visuel est saisissant. La photographie ci-dessous est publiée dans le rapport d'activité du CNRS, dans la section chimie minérale [RA CNRS, 1969] :



Début 1969, le four solaire de 1000kW est enfin opérationnel (voir photo ci-dessus). Quinze ans déjà que l'idée a été exprimée dans les rapports d'activité du Laboratoire, huit ans de constructions et de réglages ont été nécessaires. Trois corps de l'État – l'Enseignement supérieur, l'Armée, les Ponts et Chaussées –, l'Aéroport de Paris et une douzaine au moins d'entreprises privées ont collaboré, le plus souvent « avec passion », à l'édification de cette œuvre monumentale qui, selon Trombe, « restera parmi les réalisations audacieuses de notre période moderne » [CNRS, 1966]. Qu'elle ait marqué son époque est incontestable : plus grand four solaire du monde [L'indépendant, 1976], ce défi technique ne se comprend que dans le contexte politique de l'époque. Le four solaire de 1000kW répond à un triple commandement de l'ère gaullienne à son apogée : l'indépendance énergétique, l'indépendance militaire au sein de l'OTAN, le prestige de la France. N'oublions pas que Trombe a été choisi par de Gaulle en 1958 pour siéger au conseil des « douze sages », précurseur de la DGRST (III.4.2.2). Le four d'Odeillo devient opérationnel onze ans plus tard, l'année même où de

conviendra de supprimer. C'est seulement le 31 Janvier 1969, que l'on a pu examiner l'aspect de la tâche focale donnée par l'ensemble et procéder à un premier essai de fusion de plaques d'acier. » [RA LES, 1969, p. 2]. « C'est à la suite de ces essais [janvier 1969], que le laboratoire, devant une situation qui pouvait devenir catastrophique, a décidé de prendre en mains totalement la direction du réglage pour les orienteurs et pour le paraboloïde. » [p. 5]. « Le Laboratoire eut été bien plus efficace si il avait pu pour ce réglage faire travailler en régie, des spécialistes de son choix ; cela avait été demandé bien des fois, au CNRS, mais était administrativement impossible. » [p. 9].

Gaule quitte le pouvoir. En une vingtaine d'années, Trombe s'est imposé comme « l'homme du soleil » [*L'indépendant*, 1976]. Au delà du succès technologique, une inconnue de poids demeure : son coût. Le budget a forcément été estimé. Le coût final en revanche a-t-il jamais été chiffré ? Si tel est le cas, le chiffre a-t-il été rendu public ? Sinon, comment l'historien pourrait-il évaluer cette somme, accumulant autant d'heures de travail, de matériaux et d'énergie ? Le coût total est probablement exorbitant. Pour le seul bâtiment (hors équipement technique), j'avancerai un ordre de grandeur autour de cent millions de francs de l'époque (soit autant d'euros 2006). Faudrait-il doubler la somme pour prendre en compte le coût des miroirs et de toute l'électronique ?⁵³ À la louche donc, deux cents millions de francs ! En 1972, le rapport d'activité du LES donne une estimation du budget annuel de fonctionnement (hors salaire) pour le four à 1000 kW équivalent à « 400 000 francs » 1973 (soit 310000 euros 2006). Ce chiffre est double du budget de fonctionnement du LES pour les années précédentes. Le coût du four en marche serait d'environ neuf cents francs par heure (soit sept cents euros 2006) et son temps d'utilisation pourrait atteindre mille à mille deux cents heures par an.⁵⁴ L'équipe note d'ailleurs scrupuleusement l'état du ciel chaque année. L'annexe A.V.2 montre le relevé d'enselement pour l'année 1969.

V.2.1.3. L'année 1971-1972 : l'heure d'un premier bilan pour le Groupe des laboratoires d'Odeillo.

En 1960, le Laboratoire de l'énergie solaire est devenu « laboratoire propre » du CNRS [Charpentier-Morize, 1989]. La même année, une annexe commence à être construite à Odeillo pour désengorger des locaux devenus trop exigus à la citadelle de Montlouis. Durant les années soixante, alors que le four solaire à 1000kW monte ses murs à Font-Romeu (V.2.1.2.), l'équipe de Montlouis poursuit ses travaux selon les principaux axes mis en place durant les années cinquante (V.2.1.1.). En outre, elle participe à la construction et au suivi d'une « serre de culture fonctionnant avec de l'eau saumâtre » installée en bord de mer, au Laboratoire (d'océanographie) Arago à Banyuls-sur-Mer [RA CNRS, 1961, p. 192]. En 1964, devant la dispersion des travaux entrepris à Montlouis, la direction générale du CNRS veut réorganiser le Laboratoire autour de deux pôles de recherche. Le Laboratoire de l'énergie solaire, qui reste dirigé par Trombe, se focalise sur les questions solaires (fours et climatisation). Un second laboratoire propre, le Laboratoire des ultra-réfractaires (LUR), placé sous la responsabilité de Foëx, est créé autour des « études physicochimiques sur les composés réfractaires et ultra-réfractaires » ainsi que les « serres de culture ». Enfin on met formellement en place un groupe commun aux deux pôles de recherche : les « services généraux ». Chacune des parties (LES, LUR, services), qui regroupe sensiblement un tiers des effectifs initiaux, reste associée au sein d'un « Groupe » des laboratoires d'Odeillo [RA LES, 1974, p. 2]. En 1969, après vingt-cinq ans de direction, Trombe se retire du Laboratoire des terres rares (VI.3.1.2.) pour se consacrer à plein temps au four solaire à 1000kW, désormais opérationnel. Par sa personnalité, il est l'homme fort d'Odeillo,⁵⁵ jaloué aussi. Le projet

⁵³ La seule construction du nouveau bâtiment du LCS avait été estimée à sept millions de francs en 1969 (soit autant d'euros 2006) pour des proportions beaucoup plus restreintes et pour des conditions climatiques et d'accès beaucoup plus favorables (IV.4.2.1.).

⁵⁴ Une durée de 1200 heures correspond environ à un huitième de l'année (8766 heures), soit une moyenne de trois heures vingt par jour. Dans le rapport d'activité de 1961, Trombe prévoyait sept à huit heures de fonctionnement par jour.

⁵⁵ « *PT* : Vous avez connu Trombe ? – JF : Oui, très bien, j'ai été à Odeillo en visite, je le voyais aussi à Paris très souvent. Il travaillait avec Foëx qui est un homme charmant, évidemment un peu écrasé par Trombe qui était un très gros personnage. C'était le créateur du four solaire. » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 10].

pharaonique du four à 1000kW est controversé et suscite des critiques au sein de la communauté des hautes températures. On lui reproche d'être trop appliqué, d'avoir dilapidé les finances du CNRS. D'autres acteurs trouvent au contraire que c'est « une invention géniale » [I Flahaut & Rivet, 2005, p. 11].

Au delà des questions de pertinence de la politique scientifique, il est temps désormais de préciser l'impact qu'un tel projet a eu sur le paysage national et international. Pour ce faire, j'essaie de tracer le bilan de l'activité du Groupe d'Odeillo au début des années 1970 à trois niveaux : scientifique et technique d'abord ; organisationnel ensuite que ce soit par la composition du comité directeur ou par l'agencement interne des laboratoires ; médiatique enfin à travers les financements externes qu'il suscite et les visiteurs qu'il reçoit.

L'activité scientifique et technique du LES a été largement décrite précédemment (V.2.1.1, V.2.1.2). La mise au point du four à 1000 kW nécessite l'étude thermodynamique de la « tache focale ».⁵⁶ La fusion de « plaques d'acier » constitue un étalon pour suivre la puissance du four lors des réglages. Fin 1968, le cœur de la tache focale n'atteint que 1800 à 2000°C. À la fin des réglages, en octobre 1970, la température dépasse les 3000°C [RA CNRS, 1972, p. 10, 15]. Par sa puissance inégalée, le four à 1000 kW permet alors de renouveler une partie des travaux du LES. Comme ce renouveau découle principalement des contrats obtenus, je l'évoquerai au moment du bilan médiatique. Pendant du LES, le Laboratoire des ultra-réfractaires suit une logique instrumentale. Son rapport d'activité de 1964 en témoigne avec une répartition suivant deux axes principaux : appareils de caractérisation physico-chimique à haute température et mise au point de fours. Pour la caractérisation, il s'agit principalement d'« analyse thermique » (Foëx et A. Rouanet) et d'analyse structurale au-dessus de 2000°C. En effet, dès 1964, Foëx, J.P. Traverse et Jean-Pierre Coutures ont mis au point des techniques de diffraction des rayons X à haute température. La production de hautes températures utilise un « four à arc comportant des chalumeaux à plasma comme électrodes » (Foëx, G. Benezech), un « four à arc sous pression » (Traverse) en partenariat avec le Laboratoire des hautes pressions de Bellevue (M. Vodar) et « divers types de chalumeaux et de fours à plasma à arc et haute fréquence ». Contrairement aux laboratoires universitaires de chimie du solide, les matériaux servent ici plus de prétexte aux réalisations technologiques que l'inverse. En cela et par ses thèmes de recherche, il se rapproche du groupe Collongues des années 1960 (IV.3.1) [RA CNRS, 1964, p. 283-284]. Malgré son option instrumentale, le LUR a permis la détermination de nombreuses structures d'oxydes métalliques.⁵⁷

En tant qu'entité propre, le Groupe d'Odeillo est placé sous la haute autorité de la direction du CNRS. Celle-ci a mis en place deux courroies de transmission : « un Administrateur », M. Mora, est responsable du Groupe dans son ensemble et dirige les services communs, et un « Comité de direction ». En 1971, le comité de direction présente la composition suivante : un président (H. Moureu, académicien), des « représentants » du CNRS (Gallais pour la chimie, Robert Chabbal pour la physique, Collongues et Portier pour la section chimie minérale, Joseph Chapelle pour celle de thermodynamique et cinétique

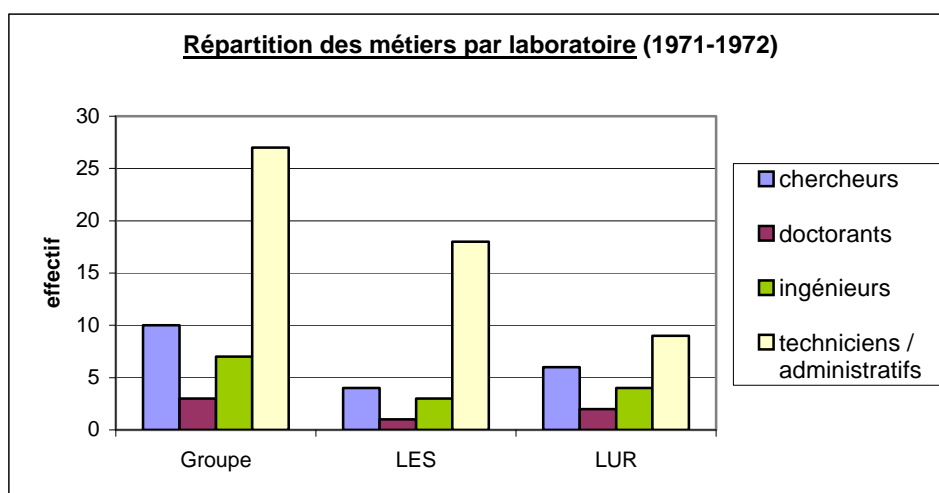
⁵⁶ « Pendant les cinq dernières années le four solaire de 1000 kW a été mis au point et sa tache focale étudiée au point de vue énergétique. » [RA LES, 1972, p. 31]. On étudie $\Phi=f(r)$ [W/cm²] où r représente le rayon par rapport au centre de la tache.

⁵⁷ « À Odeillo, il y a eu un Laboratoire des Réfractaires, à côté de celui de l'énergie solaire, qui était dirigé par un vieux collaborateur de Trombe qui s'appelait Marc Foëx. Celui-ci était spécialisé dans l'étude des oxydes réfractaires – je vous rappelle que c'était un des points de départ de tout le système – [...] Ils publiaient un grand nombre de diagrammes d'oxydes réfractaires à haute température, tout un travail de caractérisation assez fin et assez difficile. On leur doit beaucoup de diagrammes fondamentaux pour les grenats, les YAG... c'était un travail qui permettait d'avoir des documents sûrs pour faire des préparations. » [I Caro, 2005, p. 13].

chimique, M. Girerd pour l'ANVAR), des membres des laboratoires (Trombe et Foëx comme directeurs, Mora comme administrateur, Le Phat Vinh et Michel Ducarroir élus pour le LES, J.P. Coutures et C. Bonet pour le LUR), enfin des membres « nommés » par la direction du CNRS. Ces derniers, sans appartenir au CNRS, sont choisis pour leur domaine de compétence et/ou leur implication dans les recherches et sont issus des organismes de l'État (H. Baissas du CEA, P. Tavernier du Laboratoire des poudres), de l'enseignement supérieur (Bonnier à Grenoble, Yves Letort à Centrale Paris) ou de l'industrie privée (Y. Peychès ancien de Saint-Gobain, P. Jacquier de la société CERAVÉR) [RA LES, 1972]. La composition du comité directeur est conforme à la mixité de la communauté des hautes températures. On y retrouve d'ailleurs beaucoup de gens déjà rencontrés (V.1.).

Au début des années 1970, le Groupe d'Odeillo constitue une institution à l'organisation interne complexe. Au niveau des laboratoires le LUR offre une lecture classique en « groupe » de recherche. En poursuivant ses recherches originales sur les caractérisations « in situ », il s'est structuré autour de quatre « groupes » de quatre à six personnes : 1° rayons X à haute température et études sous pression ; 2° produits fondus et petits fours solaires ; 3° fours à plasma ; 4° intérêt général [RA LUR, 1971, p. 12]. De son côté, l'organigramme du LES (fourni en annexe A.V.3) est beaucoup plus complexe [RA LES, 1972].

Ce qui étonne aussi c'est la croissance rapide des effectifs du Groupe d'Odeillo : de trois chercheurs initialement, ils passent à quarante-sept au début des années soixante-dix [RA LES, 1972 ; RA LUR, 1971]. Ce développement correspond à une moyenne déjà importante de deux nouveaux postes par an – à comparer au record absolu des cinq nouveaux postes qu'obtient le LCS durant deux décennies (IV.4.2.1) –, soit une croissance annuelle de 9% légèrement supérieure à celle du CNRS (7%) sur la période 1950-1970. Il rend compte d'une volonté forte de la direction du CNRS de soutenir le projet des fours solaires. Le personnel se répartit comme suit⁵⁸ :



⁵⁸

1971-1972	chercheurs	doctorants	ingénieurs	techniciens/ administratifs
Groupe	10	3	7	27
LES	4	1	3	18
LUR	6	2	4	9

Contrairement aux laboratoires universitaires (chapitre IV), le Groupe d'Odeillo se distingue par un taux très élevé de personnels techniques. Alors que le taux (ITA/chercheur) est voisin de 1,5 pour l'ensemble du CNRS vers 1970 [Picard, 1990, p. 184], il atteint ici la valeur de 3,4. À eux seuls, les techniciens représentent 61% des titulaires (hors thésards). De leur côté, les ingénieurs constituent une catégorie presque aussi importante que les chercheurs (sept contre dix). Une telle répartition des métiers confirme l'aspect très appliqué du Groupe d'Odeillo. La mise au point et le fonctionnement des instruments (fours, électronique) occupent une large part de l'activité du Groupe. Ceci est surtout vrai pour le Laboratoire de l'énergie solaire dont la tâche principale consiste à faire fonctionner le four à 1000kW à partir de 1970. Le Laboratoire des ultra-réfractaires quant à lui développe plus de recherches fondamentales : son spectre de compétence est plus équilibré entre techniciens (9), ingénieurs (4) et chercheurs (6) que ne l'est celui du LES où les techniciens sont beaucoup plus nombreux que les autres métiers. On note aussi la présence de trois thésards seulement pour l'ensemble du Groupe dont deux au LUR, financés par le CEA. La répartition des métiers constitue un bon indicateur de l'orientation principale d'un laboratoire. La direction du CNRS considère le Groupe d'Odeillo comme une unité propre à vocation essentiellement appliquée – surtout pour le LES –. Même pour le plus fondamental des deux laboratoires, le LUR, le financement des thèses par l'industrie nucléaire confirme que les matériaux sont d'abord considérés par rapport à leurs applications. Néanmoins, le statut professionnel ne présume pas toujours de l'activité quotidienne. Aussi il s'agit de corrélérer cet indicateur de répartition professionnelle avec la nature des financements du Groupe.

Comme pour tout laboratoire propre, le budget (hors salaire) du Groupe d'Odeillo dépend essentiellement du CNRS. Si on prend le LES seul, sur la période 1968-1972, le montant accordé par le CNRS atteint un maximum en 1970 à 552 000 francs (soit 525 000 euros 2006) puis diminue en valeur relative.⁵⁹ Dans le même temps, le montant cumulé des contrats – cinq sont recensés – est de l'ordre de 240 000 francs [RA LES, 1972, p. 18], ce qui ne représente qu'environ 10% du budget CNRS. Pour le four solaire à 1000 kW, l'activité se présente sous deux facettes, soit effectuer des réglages techniques (four « à cavités », « à accumulation », fusion « en tas », atmosphère contrôlée, dispositifs de régulation), soit agir sur divers matériaux (chocs thermiques, fusion, extraction, purification, cristallogénèse). Deux remarques peuvent être faites ici. Premièrement, les deux facettes de l'activité sont liées l'une à l'autre, étudier un matériau étant indissociable de réglages techniques et vice versa. Deuxièmement, il n'est pas toujours facile de distinguer ce qui est commandité par des contrats externes de ce qui correspond à une dynamique interne. Un seul exemple illustrera les deux remarques :

« On a très souvent souligné l'importance de la réalisation d'un traitement sous atmosphère contrôlée qui accroîtrait considérablement les possibilités d'application du four solaire de 1000 kW tant dans le domaine de la métallurgie à haute température que dans celui de l'exploitation des chocs et flux thermiques pour les tests des matériaux. » Une telle assertion répond à une dynamique interne, ou désir d'améliorer les performances du four. Cependant, « l'étude du problème des traitements sous atmosphère contrôlée au four solaire de 1000 kW a été abordée [...] à l'occasion d'essais demandés au Laboratoire : fusion et coulée de bore avec mise en forme sous argon [par le

⁵⁹ Par la suite, je me concentrerai sur le budget du LES seul parce que c'est le seul dont je dispose mais aussi parce que c'est à lui qu'est rattaché l'installation stratégique : le four à 1000 kW. Le rapport d'activité indique les crédits suivants (exprimés en kilo-francs de chaque année) accordés par le CNRS : 332,2 (1968) ; 486,2 (1969) ; 552,45 (1970) ; 559,2 (1971) ; 554,7 (1972) [RA LES, 1972, p. 24].

CEA] et obtention d'un fort gradient de température dans les échantillons de graphite à l'abri de l'air (cf. collaboration Centre de recherche Paul Pascal, professeur Pacault). » [RA LES, 1972, p. 12]. Une volonté interne n'est mise en action que sous la pression d'une double force externe : répondre au cahier des charges d'un matériau à tester et à une collaboration avec un laboratoire universitaire de chimie physique.

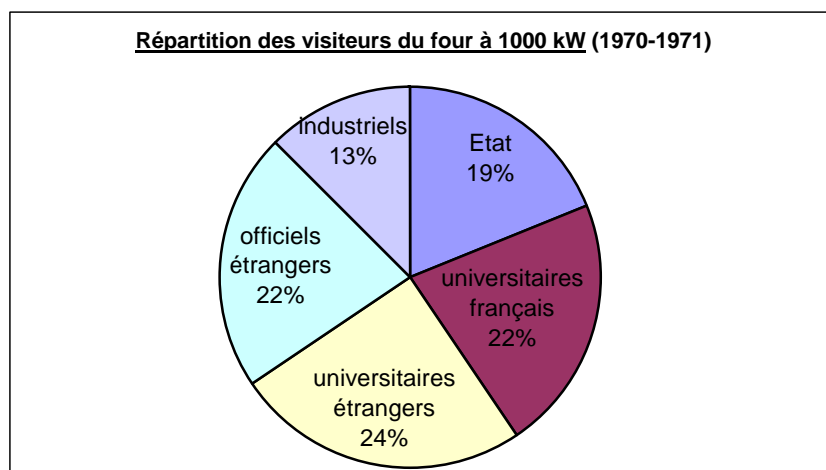
L'activité multiforme du Laboratoire répond donc autant à des sollicitations extérieures qu'à des volontés intérieures. Précisons un peu les contacts que le LES développe avec l'extérieur à travers le four solaire à 1000 kW. Il y en a deux types : les contractuels et les non contractuels, les premiers se traduisent par un service contre rétribution tandis que les seconds répondent à des intérêts non financiers. Commençons par ceux qui payent en espèce : qui sont-ils et que commanditent-ils ? On trouve quelques entreprises privées – Ugine-Kuhlmann, CGE, CERAVÉR – mais ce sont essentiellement les organismes d'État liés aux matériaux réfractaires stratégiques :

- l'armement : Laboratoire central (LCA), Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA), Direction des constructions des armes navales (DCAN), Direction des recherches et moyens d'essais (DRME) ;
- le nucléaire avec le CEA, en particulier la Direction des applications militaires (DAM) ;
- l'aérospatiale : l'ONERA, la Société européenne de propulsion (SEP), le Centre d'étude et de recherche de Toulouse (CERT).

Mis à part deux contrats instrumentaux (récepteurs héliothermiques pour l'ONERA et modulation de flux pour le LCA), toutes les autres demandes portent sur le traitement thermique de matériaux au four à 1000 kW, que ce soit pour des « chocs thermiques » (LCA, LRBA, SEP, CEA), pour des fusions de bore (CEA) ou de zircon (Ugine), pour des traitements de bauxite (CERAVÉR) ou pour la synthèse d'alumine bêta (CGE). En parallèle avec ces contrats, l'équipe s'est efforcée, dans un souci de « rentabilité » du four solaire à 1000 kW de développer des méthodes de purification semi-industrielle compétitive. Pour l'« alumine », le coût de revient s'est avéré trop élevé par rapport aux méthodes employées par Ugine mais il pourrait être intéressant pour l'alumine bêta [RA LES, 1972, p. 15-16]. Cependant, même pour le four à 1000kW, le débit de produits traités reste faible par rapport aux multinationales. Ainsi, à aucun moment, le Groupe d'Odeillo n'a pu rivaliser pour le traitement des terres rares avec un industriel comme Rhône-Poulenc.⁶⁰

En ce qui concerne les collaborations (gratuites), le LES dispose d'un atout de choix : grâce à ses fours, il peut tester les matériaux dans des conditions thermiques extrêmes. Ainsi, les laboratoires étudiant les réfractaires auront tendance à vouloir collaborer avec le Groupe d'Odeillo. Plusieurs laboratoires de chimie du solide en particulier sont proches d'Odeillo : le Laboratoire des terres rares bien sûr (IV.2.) mais aussi l'équipe Perez y Jorba à Vitry-sur-Seine (IV.3), Anthony et ses collaborateurs à Orléans, le Laboratoire Flahaut à Paris (IV.1.)... De nombreux visiteurs fréquentent le four solaire à 1000 kW après sa mise au point : au cours de l'année 1970-1971, on compte plus de trente jours de visite, du chimiste venu tester ses échantillons à la délégation russe accompagnée de représentants du CEA. Une analyse rapide donne la répartition suivante :

⁶⁰ « Le problème qui s'est posé très vite pour la production en grande quantité des terres rares, c'est que le four solaire ne faisait pas le poids face à des grands groupes industriels comme Rhône Poulenc. » [I Caro, 2005, p. 3].



Autant d'universitaires que de représentants des États ou des industries, autant d'étrangers que de Français. Qu'ils soient physiciens, chimistes ou ingénieurs, qu'ils soient Russes, Américains ou Britanniques, chacun vient visiter les installations d'Odeillo, pour des raisons différentes. Ce sont les États-Unis qui sont le plus intéressés par les performances du four à 1000 kW. Celui qui a été construit à Natick, de taille beaucoup plus modeste, n'atteint pas la puissance d'Odeillo. En juillet 1972, le département américain de la Défense signe un contrat de 160 000 francs (soit les deux tiers de l'ensemble des contrats signés en quatre ans par le LES) avec le CNRS visant à « l'évaluation des matériaux dans un environnement de haute température [...]. *L'US Army Materials and Mechanics Research Center* est représenté par un responsable consultant, le Dr Walton de l'Institut universitaire de Technologie de Georgie. » [RA LES, 1972, p. 8, 19].

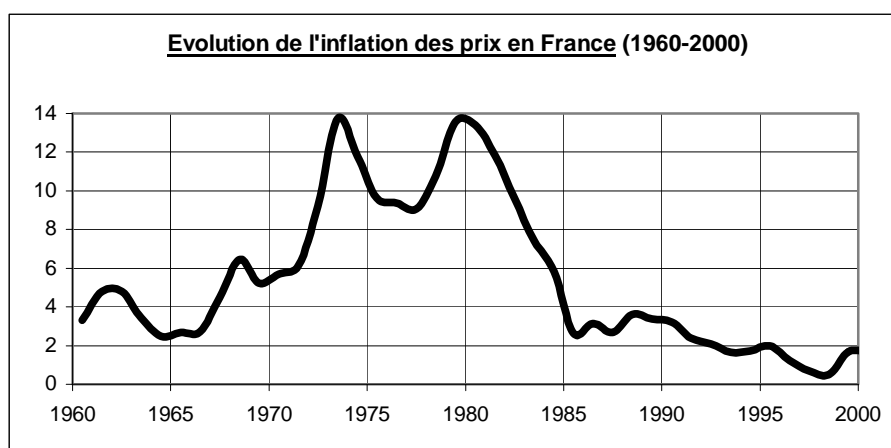
Pour conclure : au début des années soixante-dix, le four à 1000 kW peut être considéré comme une réussite technologique au niveau international. Les deux Grands du monde viennent le visiter et le département américain de la Défense signe même un contrat mirobolant avec le LES. Trombe a réussi le pari audacieux qui place le four solaire à 1000 kW parmi les grandes réalisations technologiques de l'ère gaullienne. Depuis que les réglages sont terminés, le four permet des traitements thermiques uniques, au-delà de 3000°C, pour tous les matériaux stratégiques dans des conditions extrêmes (militaire, nucléaire, aérospatiale). Au CNRS, le Groupe d'Odeillo s'inscrit dans la double perspective d'une recherche fondamentale et appliquée, entre matériaux et instruments, entre état solide et hautes températures. Par ses effectifs, les brevets qu'il dépose entre 1950 et 1970⁶¹, les contrats qu'il honore, son accointance avec les militaires et le CEA, son souci de rentabilité, il se présente comme un laboratoire d'essais. Par ses directeurs, la participation de certains de ses membres aux réunions de la Société, par sa double compétence technologique et de recherche, il se situe dans la droite ligne de la communauté des hautes températures (V.1). Enfin, par son intérêt pour le solide fondamental, pour ses travaux en purification, en cristallogenèse, en caractérisation structurale et mesures physiques, il participe aussi à la construction de la communauté de chimie du solide (chapitre III).

⁶¹ Parmi les principaux brevets du CNRS pour l'année 1956-1956, on trouve deux brevets de Trombe, le premier sur l'« Application de l'Energie solaire à l'obtention de produits chimiques purs », le second tourné vers la « Climatisation des habitations à l'aide de l'Energie solaire (Trombe) » [RA CNRS, 1957, p. 15]. « Ces nombreux essais, qui ont comporté le traitement de plus de 7 tonnes de produit réfractaires divers, ont abouti à un brevet (CNRS/CGEC) demandé en Février 1970 et déposé par l'ANVAR le 31 Juillet 1970. » [RA LES, 1970, p. 1].

V.2.2. De la chimie des hautes températures aux sciences pour l'ingénieur

V.2.2.1. Nouvelle donne énergétique et politique scientifique (1973-1982)

En France, l'année 1972 est marquée par une forte inflation des prix. L'année suivante, la quatrième guerre israélo-arabe met le feu aux poudres et le prix du brut s'envole. En trois mois à peine, d'octobre à décembre, le prix du baril de pétrole est multiplié par quatre, passant de 2,9 à 11,6 \$ [Carsalade, 1998, p. 277]. C'est le premier choc pétrolier. L'ensemble des pays occidentaux est touché. La France, très dépendante des pays arabes pour son approvisionnement, subit le choc de plein fouet. Le prix des biens de consommation augmente fortement, l'inflation grimpe à 14% en France. L'indice des prix à la consommation évolue selon la courbe suivante⁶² :



Le premier choc pétrolier a un impact très fort sur l'inflation et il déstabilise la monnaie – ici, le franc, qui subira des dévaluations successives (par rapport aux devises étrangères) –. Par la suite, de 1974 à 1978, le baril reste très cher, entre 12 et 15\$. Au début de l'année 1979, la « révolution iranienne » bloque les exportations de brut du pays. L'offre étant drastiquement réduite et la demande restant forte, le prix du baril connaît une nouvelle croissance spectaculaire : il est doublé passant de 15\$ à plus de 30\$ en janvier 1981 [Carsalade, 1998, p. 277]. En moins de huit ans, le prix du brut a été multiplié par dix. En France, l'inflation reste forte – plus de 10% – durant une décennie environ (1972-1982) avec un nouveau pic à 14% en 1980. Le premier choc pétrolier place la question énergétique au cœur des préoccupations politiques occidentales. Pour la France, le dilemme énergétique est de réussir à concilier une rentabilité économique – prix de revient le plus bas – à une indépendance stratégique. La principale réponse donnée à la crise sous le septennat de Valéry Giscard

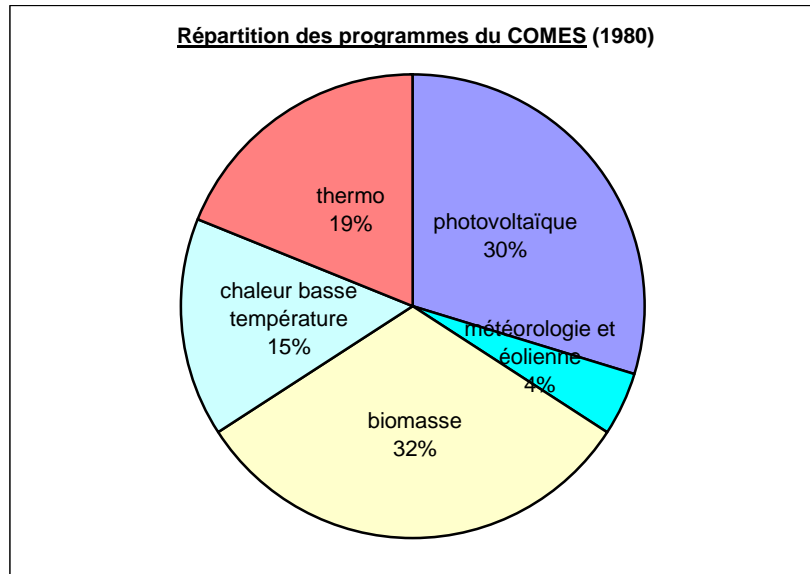
⁶² En travaillant sur les séries « Déflation par l'indice général des prix à la consommation » de l'INSEE, j'ai calculé la variation relative du coefficient multiplicateur d'une année (i-1) sur l'année (i) puis j'ai multiplié par 100 pour obtenir l'indice des prix à la consommation : $(1 - C_i/C_{i-1}) * 100$. J'ai estimé que cette valeur correspondait au milieu de l'année (i-1/2). Elle correspond à peu près à l'inflation de la monnaie.

d'Estaing consiste à intensifier la production électrique nucléaire. De manière secondaire, l'énergie solaire se trouve elle-aussi valorisée comme une source d'énergie disponible et renouvelable. Il existe une Association française pour l'étude et le développement des applications de l'énergie solaire (AFEDES). Au cours des années soixante-dix, deux « agences d'objectifs » sont mises en place pour développer l'énergie solaire en France, l'une par CNRS, l'autre par le ministère de l'Industrie [COMES, 1980, p. 4].

En 1975, la direction générale du CNRS invente une nouvelle forme de recherche coopérative : les « programmes interdisciplinaires de recherche » (PIR) qu'elle place sous sa dépendance directe (III.4.3.3). Le but recherché est de « créer une dynamique de recherche aux interfaces entre disciplines » au-delà des clivages entre départements et en associant les industriels [Lanciano-Morandat, 1999, p. 67]. Le premier PIR est justement le « Programme Interdisciplinaire de Recherche pour le Développement de l'Énergie Solaire » (PIRDES) [Guthleben, 2007]. Une telle initiative confirme le caractère transversal de l'énergie solaire – ce qui avait été mis en évidence par les travaux d'Odeillo : de la physique à l'océanographie en passant par la chimie – et l'urgence de son utilisation. Le PIRDES, placé sous l'autorité de Chabbal, « est accueillie favorablement » [Demanée, 1989, p. 82]. À sa création, il a « pour mission de définir, de coordonner et de promouvoir les recherches visant à rendre techniquement et économiquement faisable l'utilisation de l'énergie solaire. » [RA CNRS, 1982, p. 44]. Le PIRDES s'occupe donc seulement de recherche mais avec une ambition très appliquée. Par la suite, Chabbal est remplacé par Michel Rodot, directeur du Laboratoire de physique des solides de Bellevue.

Par le décret du 9 mars 1979, le gouvernement de Raymond Barre crée un « Commissariat à l'énergie solaire » (COMES).⁶³ Sur le modèle du CEA – mais à une dimension infiniment plus faible –, c'est un établissement sous la tutelle du ministère de l'Industrie ayant « pour mission, en liaison avec les organismes publics et les entreprises privées concernés, de développer la connaissance de l'énergie solaire, les études et les recherches permettant son utilisation et d'en promouvoir les applications » [COMES, 1980, p. 8]. Rodot, alors directeur scientifique de la physique au CNRS, est nommé président. Au conseil scientifique siègent Jean-Pierre Causse (directeur général adjoint de Saint-Gobain), Ionel Solomon (professeur de physique à Polytechnique) et des représentants de divers organismes publics : ministère, DGRST, ONERA, EDF, INRA, Ingénieurs Eaux et Forêts, SEP, Institut Curie, CGE. Le budget alloué atteint cent millions de francs la première année puis double en 1980 (soit 78 millions d'euros 2006). Le COMES se distingue du PIRDES par son budget – beaucoup plus important – et par son mode d'action : le financement de la recherche (40% des dépenses, dont une partie pour le PIRDES) mais aussi l'organisation et le financement de programmes sur le terrain (50% des dépenses). Ces programmes touchent à divers secteurs de l'énergie solaire :

⁶³ En 1993, le COMES fusionne avec trois autres organismes pour donner l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).



Le premier grand chantier du COMES porte sur la thermodynamique solaire. Il s'agit de mettre en place deux centrales « Thémis », l'une à Targassonne en Pyrénées-Orientales, l'autre à Vignola en Corse. Ces centrales captent l'énergie solaire grâce à deux cents héliostats de 53 m², soit une surface de 10740m². La chaleur captée par les héliostats est emmagasinée dans des sels fondus et peut être stockée jusqu'à six heures après exposition. Sur le principe d'une centrale thermique, elle permet de chauffer des fluides qui, par des transformations thermodynamiques, produit de l'électricité. La production électrique estimée d'une telle centrale est voisine de 3500 MWh par an,⁶⁴ fournie au réseau EDF [COMES, 1980].

Pour l'année 1980, le « budget solaire » de la France se chiffre en centaines de millions de francs : trois cents millions investis par les particuliers, deux cent quatre-vingts par les ministères et organismes publics, cent soixante millions par les collectivités locales, entreprises nationales ou industries privées, sans oublier le COMES [COMES, 1980]. Le total de l'investissement approche un milliard de francs (soit trois cent soixante millions d'euros 2006). Après le deuxième choc pétrolier de 1980 et l'arrivée au pouvoir de Mitterrand, la « production et utilisation rationnelle de l'énergie et [la] diversification énergétique » sont inscrites parmi les « programmes mobilisateurs » des « grandes actions volontaires que le gouvernement veut engager d'ici à 1985 » [MIN, 1982]. Au sein des « énergies renouvelables », « l'énergie solaire » participe de cette politique scientifique. Le PIRDES devient PIRSEM en 1982 : « programme interdisciplinaire de recherche sur les sciences pour l'énergie et les matières premières ». Un tel élargissement en associant l'énergie aux matières premières recherche une approche globale qui inscrit la science au cœur d'une perspective sociétale beaucoup plus vaste.

La décennie 1972-1982 bouleverse donc la donne géostratégique de l'énergie. En France, la politique énergétique change d'échelle par les moyens impliqués et les objectifs affichés. Le CNRS se restructure. Localement, la crise globale induit des changements significatifs dont le Groupe d'Odeillo offre un cas d'école.

⁶⁴ Si on ose une comparaison entre l'énergie produite par le four solaire à 1000kW et celui d'une centrale Thémis, on obtient : 1MWh/an pour le four (avec une surface cinq fois moindre) contre 3,5MWh/an pour la centrale. Même si dans le cas du four, il s'agit d'une énergie thermique (non transformée en électricité), on voit que son rendement par mètre carré est meilleur que celui de la centrale Thémis.

V.2.2.2. Crises globales, conséquences locales : réorganisation et migration d'Odeillo

Ce qui peut surprendre dans le tournant énergétique – en particulier solaire – de la décennie 1972-1982 est l'absence des très hautes températures. Que ce soit pour les programmes du COMES (V.2.2.1.) ou les projets soutenus par le PIRDES (puis le PIRSEM) [RA CNRS, 1982, p. 45], les laboratoires de la communauté des hautes températures (V.1.) ne sont pas au cœur de l'action. On aurait aussi pu s'attendre à ce qu'un des responsables du Groupe d'Odeillo participe à la mise en place du PIRDES mais tel n'est pas le cas.⁶⁵ C'est plutôt le contraire qui s'opère et ce sont plutôt les physiciens qui mènent le bal. Chabbal et Rodot siégeaient déjà au comité directeur du LES. Leur influence est renforcée puisque le PIRDES (ils en sont successivement présidents) « a un droit d'intervention sur toutes les activités du type solaire, donc, en particulier, sur les deux laboratoires du groupe d'Odeillo » [RA LES, 1977, p. 2].

Bien que Trombe dispose toujours de l'appui de sa hiérarchie puisqu'il a été chargé par le CNRS d'organiser un « groupe de prospective sur les concentrations d'énergie solaire » [RA LES, 1974, p. 4], son programme ne peut être une ressource en temps de crise énergétique car les fours solaires consomment beaucoup plus d'énergie qu'ils n'en produisent. L'enjeu est ailleurs. La direction du LES a rapidement pris conscience de la nouvelle donne énergétique et des conséquences possibles pour le laboratoire : « La situation actuelle, en ce qui concerne les énergies de remplacement, fait apparaître la nécessité d'une action immédiate qui doit avoir sa répercussion sur l'orientation et le développement du laboratoire. » [RA LES, 1974, p. 3]. Selon l'auteur du rapport (Trombe sans aucun doute), il faut distinguer les besoins des « pays développés » de ceux des « pays en voie de développement ». Pour les premiers, il suggère une diminution de la consommation énergétique grâce aux « applications domestiques » (étudiées à Montlouis depuis plus de vingt ans) et la poursuite des recherches pour les « grandes centrales solaires » (de type Thémis), qui ne sont pas encore rentables. Pour les seconds, les besoins sont différents et plus locaux : « force motrice à échelle réduite, eau pure, froid, dessiccation, cuisson des matériaux, etc. ». Le LES participe lui-même « à un programme de collaboration avec les pays du Sahel [Mali] et l'Amérique latine [Chili] », mais appelle de ses vœux de nouveaux « contacts et échanges scientifiques et techniques avec bien d'autres pays. » [RA LES, 1974, p. 4-5].

C'est donc plutôt par sa contribution à la domotique solaire que le LES prend de l'importance au niveau national. Trombe succède à Peychès à la direction de l'AFEDES à partir de mars 1974. L'AFEDES associée au CNRS et à l'ANVAR lance une « action d'envergure » sur le « chauffage de l'eau [et] des habitations » par utilisation de l'énergie solaire à laquelle participe le LES. C'est encore lui qui représente la France aux réunions du « Comité sur les défis de la société moderne » portant sur les questions de domotique solaire, qui se tiennent à Bruxelles, à partir de 1973. Ce comité dépendant de l'OTAN engage une action « pour le chauffage et la climatisation des habitations » pour laquelle les États-Unis sont nommés « pays pilote », la France et le Danemark, « pays copilotes ». Les États-Unis sont désormais leaders mondiaux en « applications domestiques de l'énergie solaire » grâce à l'effort important entrepris « sous l'impulsion de la NSF [*National Science Fondation*] et de la NASA » [RA LES, 1974, p. 36bis].⁶⁶

⁶⁵ Pour le PIRDES : « Equipe de direction : Michel Rodot (dir.), Maurice Claverie (sous-dir.), Edouard Rochet (secrétaire général), Alain Dupas et Rémy Lestienne (chargés de mission), Jean Deflandre, Jean-Laurent Peube et André Vialaron (conseillers scientifiques). » [RA CNRS, 1979].

⁶⁶ « Le CNRS n'a pas su se servir de tout cela, il y avait des raisons politiques et l'électricité était à la mode. Aux Etats-Unis, il y a une sorte d'hommage posthume puisqu'en Californie, ils ont appelé les murs chauffants des maisons solaires des « Tromby ». » [I Caro, 2005, p. 3].

Concomitamment, l'organisation du Groupe d'Odeillo se trouve modifiée. En 1974, la direction du CNRS rattache le Laboratoire de l'énergie solaire à l'une des deux directions de la physique – celle des « sciences pour l'ingénieur » (dirigée par Jean Lagasse) – alors qu'elle laisse le Laboratoire des ultra-réfractaires dans le giron de la chimie (dirigée par Cantacuzène). La migration administrative induit des migrations individuelles en sens inverse : si les trois chercheurs du LES – Michel Ducarroir, B. Armas et G. Male – veulent continuer à être évalués par une « commission compétente [en] chimie des hautes températures », ce qui est indispensable pour l'avancement de leur carrière, ils doivent se faire muter au LUR. Quelques techniciens et ingénieurs de leurs équipes les accompagnent [RA LES, 1977, p. 1-2]. Ces migrations individuelles s'accompagnent d'un recentrage des activités des deux laboratoires. Le LUR aborde « au niveau fondamental tous les problèmes de chimie solaire, par exemple : les réfractaires, la métallurgie, la production d'hydrogène ». En revanche, les « études pouvant conduire à des opérations en demi grand et en grand » relèvent de la compétence du LES. Seule inconnue : la place du fondamental dans la « recherche pilote » du four à 1000 kW [RA LES, 1977, p. 1-2]. La réorganisation administrative et scientifique clarifie donc le rôle de chacune des deux entités propres mais fragilise la dynamique interactive que les deux compères, Trombe et Foëx, avaient su insuffler au Groupe d'Odeillo, malgré la séparation institutionnelle de 1964 (V.2.1.3.). Il s'agit désormais d'assurer une double succession. En 1976, Trombe sera atteint par l'âge limite de la retraite au CNRS – soixante-dix ans – tandis que Foëx en aura l'âge légal – soixante-cinq ans –. Pour faciliter la passation de pouvoir, le futur directeur, Jean-Laurent Peube, est nommé directeur-adjoint de Trombe en octobre 1975. Il occupe alors la direction du Laboratoire d'études aérodynamiques et thermiques de Poitiers et une position de « conseiller » au PIRDES.

En avril 1976, Trombe quitte la direction du LES. Pour son départ, une fête célèbre son œuvre sur un triple registre : le spéléologue explorateur, le chimiste spécialiste des terres rares, et le pionnier pour l'énergie solaire. Cette fête marque un changement d'époque à Odeillo. À quelques jours près, elle coïncide avec la mise en marche de la « première centrale solaire » française [*L'indépendant*, 1976]. Lors de la passation de pouvoir, le laboratoire change de nom pour « Laboratoire de l'énergétique solaire », est partagé désormais entre Poitiers, où se trouvent une vingtaine d'enseignants et étudiants, et Odeillo, où demeurent une trentaine de personnes, majoritairement techniciens et ingénieurs. La DGRST, intéressée par les applications, fournit la plus grande part des bourses de doctorat aux étudiants du laboratoire. La même année, le CNRS, qui a mis en place les départements scientifiques, le place sous la tutelle des « sciences pour l'ingénieur », dans la section 4 (énergie et matériaux). Le comité de direction change de visage, plus d'industriels y sont nommés (ONERA, EDF, CEN Grenoble, ministère de l'Équipement), les disciplines de rattachement sont plus diversifiées (héliophysique, météorologie, matériaux). Désormais, seuls deux chimistes du solide y siègent : Collongues et Gérard Villeneuve (LCS), mais leur présence tient plus du lien historique que de la collaboration effective. Parmi la trentaine de laboratoires mentionnés dans les relations extérieures, on trouve des laboratoires de thermodynamique, d'énergétique, de météorologie et de physique de l'atmosphère, d'astronomie, de géologie, de biologie, d'architecture. Aucun – à part le LUR – ne se réclame plus de la chimie du solide. Le Laboratoire poursuit des collaborations avec les « pays en voie de développement » (Algérie, Chili, Maroc, Mexique), qui financent des bourses pour leurs ressortissants. Mais l'essentiel de ses relations internationales s'orientent vers les États-Unis (vingt-quatre contacts) et peu en Europe (quatre à l'Ouest et un avec la Russie) [RA LES, 1977, RD p.9-10]. De par le succès du four à 1000 kW, unique par ses dimensions, le Laboratoire est finalement devenu un « laboratoire d'essais » permettant d'étudier les chocs thermiques et leur effet sur des

matériaux stratégiques : fuselage d'un avion, d'une fusée ou d'un missile par exemple.⁶⁷ Ainsi le LES a des clients aussi prestigieux que Boeing Company, Aerospace Corporation, Mac Donnell-Douglas Astronautics ou Lockheed Missiles and Space Company... [RA LES, 1977, RD p.10]. Par la suite, le four solaire d'Odeillo sera rattaché à l'Institut de science et de génie des matériaux et procédés de Perpignan (IMP).⁶⁸

Le Laboratoire des ultra-réfractaires reste d'abord rattaché au département de la chimie avant de suivre une trajectoire similaire à celle du LES, avec un léger décalage dans le temps. Foëx parti en 1977, son successeur, Georges Urbain (issu de l'IRSID), ne noue pas de très bonnes relations avec les personnels ITA et chercheurs. Dans ce contexte, au début des années 1980, Coutures, alors « maître de recherches », rejoint Orléans où il prendra la succession de Cabannes et Anthony. Il insufflera au Centre de recherches sur la physique des hautes températures l'idée des caractérisations *in situ* en développant la RMN à très haute température [CNRS, 1989], ce qui constitue un « exploit de la chimie des matériaux ». ⁶⁹ Au LUR, Urbain cède la place en 1984 à un chercheur du cru, Ducarroir, qui assure la transition de la section 14 (chimie et physico-chimie des matériaux inorganiques) vers le département des sciences pour l'ingénieur. Le Laboratoire disparaît alors lui-aussi de l'horizon des solidistes.⁷⁰

Ainsi, le premier choc pétrolier qui a mis l'énergie solaire au goût du jour, exigeait un virage et des résultats concrets. Le CNRS qui a participé à cette logique appliquée en créant un département de sciences pour l'ingénieur et des programmes interdisciplinaires de recherche, a redéfini les missions du centre d'Odeillo. À l'occasion du départ à la retraite des pionniers, la direction du CNRS transfère le Laboratoire de l'énergie solaire du département de chimie vers le département des sciences pour l'ingénieur. Le four à 1000 kW dont les caractéristiques techniques sont inégalées devient un laboratoire d'essais pour les matériaux stratégiques militaires, aéronautiques et nucléaires des industriels français et états-uniens. Cette migration institutionnelle achève le déplacement communautaire commencé une trentaine d'années plus tôt : ce laboratoire qui a pris son élan dans la chimie des hautes températures (1950-1960) puis fréquenté assidûment la communauté de chimie du solide en train de se former (1960-1970) s'en est trouvé exclu à cause de travaux jugés trop peu fondamentaux, puis il a été absorbé dans la constellation des sciences pour l'ingénieur, au prix d'une reconversion en laboratoire d'essais. Étonnamment, avec quelques années de décalage à

⁶⁷ « PT : Le four solaire a alors été abandonné ? – PC : Non, le four solaire fonctionne toujours [...] Il est passé dans la section des « sciences pour l'ingénieur » du CNRS et est devenu très important pour des raisons que l'on ne soupçonnait pas à l'avance comme toujours. Le four est utilisé pour faire des mesures expérimentales de chocs thermiques, on peut appliquer en un dixième de seconde, 3000°C sur une surface et ça a des conséquences importantes pour des essais sur des matériaux exotiques, notamment les 'nez' des chasseurs à réaction, qui se heurtent comme ça à des hautes températures. L'armée a construit un autre four solaire à côté pour des essais et les Américains louent régulièrement le four d'Odeillo pour des essais de chocs thermiques, quelle que soit la nature de la substance qu'on chauffe. Ce n'est pas utilisé pour le matériau mais pour la thermodynamique pure, chocs thermiques et contrastes de températures violents. Appliquer 3000°C d'un coup sur une surface, ce n'est possible qu'avec le four solaire d'Odeillo. C'est un laboratoire d'essais. [I Caro, 2005, p. 13].

⁶⁸ Pour un laboratoire propre comme l'IMP, le rapport (salaire/budget CNRS) vaut 86% à la fin des années 1990, ce qui est proche du taux pour l'ensemble du CNRS [Lettres SPI, 1996-1999].

⁶⁹ « Jean-Pierre Coutures [...] est ensuite parti remplacer Mme Antony à la direction d'un laboratoire à Orléans consacré aux réfractaires. Ce laboratoire était assez proche de Collongues. À Orléans, Jean-Pierre a réussi une manipulation assez extraordinaire qui fonctionne encore je crois : il a réalisé de la RMN sur des oxydes fondus à 2000°C, ce qui est vraiment un exploit de la chimie des matériaux. » [I Caro, 2005, p. 14].

⁷⁰ Interrogé sur le devenir du Groupe d'Odeillo, Caro, qui en fut très proche durant les années soixante, répond : « il y a un Laboratoire des Hautes Températures à Odeillo mais je ne sais plus qui le dirige maintenant. » [I Caro, 2005, p. 13].

peine, le Laboratoire des ultra-réfractaires suit la même parabole à travers les hautes températures puis les solides, devenus matériaux très appliqués. Par cette double migration sociale et cognitive, le groupe d'Odeillo, qui a fait la fierté de la communauté nationale des hautes températures, puis de l'état solide, disparaît de l'horizon des solidistes français.

Conclusion

Après-guerre, la chimie des hautes températures constitue une communauté aussi importante que celle de chimie métallurgique ou de chimie de l'état solide. Toutes trois, essentiellement regroupées en région parisienne, interfèrent en permanence. En effet, premièrement, elles étudient des objets semblables – les solides – avec de légères nuances – matériaux réfractaires, alliages métalliques, composés ioniques –, deuxièmement, elles se pratiquent au sein des mêmes laboratoires, et enfin, se reconnaissent les mêmes figures emblématiques, les mêmes mandarins. Au début des années cinquante, l'un d'entre eux, encore jeune mais puissant (sans être bachelier), se lance dans l'aventure de l'énergie solaire pour produire des hautes températures permettant de synthétiser des solides (réfractaires, métalliques ou oxydes). Soutenu par la hiérarchie du CNRS, disposant de l'appui du pouvoir politique à la fin des années cinquante, et fort d'un réseau de relations qui s'étend jusque dans l'Armée, Trombe est l'artisan principal des fours solaires d'Odeillo. Il a su fédérer des forces et initier un domaine de recherche encore vierge. La construction et la mise au point du four solaire à 1000 kW fut un projet grandiose que même les Américains et les Russes au temps de la surenchère déraisonnable n'ont pas égalé pour l'énergie solaire. Rien ne laissait prévoir que ce fleuron prestigieux de la recherche française deviendrait un laboratoire d'essais pour matériaux stratégiques.

Cette évolution de la recherche vers l'essai technique implique des migrations de communautés scientifiques. La Commission des hautes températures perd l'importance qu'elle a eue au cours de la décennie cinquante. Au contraire, c'est l'essor en France de la chimie du solide qui s'impose comme un groupe incontournable en chimie minérale avec ses méthodes propres, ses instruments et ses légendes communautaires. Les hautes températures, si elles remplissent le quotidien des solidistes, et si le solide cristallisé est devenu l'objet de connaissance le plus prisé, n'apparaissent pourtant pas dans les programmes (III.2.2). Les chercheurs d'Odeillo participent alors activement à la synthèse et à l'étude structurale et physique de nouveaux matériaux.

Avec le tournant des années soixante-dix et la crise de l'énergie, le Groupe d'Odeillo, est restructuré entre chimie (LUR) et sciences pour l'ingénieur (LES) autour d'objectifs précis. Le LES se vide de ses chercheurs au profit du LUR, qui, à cause de problèmes relationnels entre la direction et la base, perd sa joie de vivre. Quelques-uns s'en vont et le LUR est à son tour intégré aux sciences pour l'ingénieur. Ainsi, le Groupe d'Odeillo, réorienté vers la science appliquée, devient un prestataire de service fonctionnant sur contrats. Ce faisant, il quitte définitivement la communauté de chimie du solide, bien soudée dans les années 1980.

Cet exemple complexe met en évidence une double migration communautaire. La communauté des hautes températures disparaît par dispersion de ses membres tandis que la communauté de chimie du solide se construit sur l'exclusion de ses alliés devenus trop éloignés de son programme. Ainsi un domaine de recherche illustrant ce que l'on appelle un régime transversal a été marginalisé au fil des reconfigurations de la communauté scientifique.

Troisième partie.

La diaspora (1970-2000)

Chapitre VI.

Trente ans de renouveau
en chimie des solides (1970-2000) :
instruments, méthodes et gestion
de la recherche.

Chapitre VI. Trente ans de renouveau en chimie des solides (1970-2000) : instruments, méthodes et gestion de la recherche..... 353

<i>Introduction</i>	355
<i>VI.1. Synthèses à basse température, de la périphérie vers le centre.</i>	358
VI.1.1. À l'ombre des hautes températures : deux études de cas (1950-1970).....	358
VI.1.1.1. L'étude interdisciplinaire des phosphates au CECM.....	358
VI.1.1.2. Les oxydes métalliques revisités par la « méthode des précurseurs » au Laboratoire de chimie minérale de Lyon	361
VI.1.2. De l'ombre à la lumière, l'émergence de la « chimie douce » (1970-2000).....	368
VI.1.2.1. Chimie douce entre « précurseurs » et « insertion », une dualité trompeuse ?	369
VI.1.2.2. Quelques repères spatio-temporels en France.....	375
VI.1.2.3. Débat des Anciens et des Modernes sur la chimie douce	379
VI.1.3. De l'actualité des synthèses à basse température à la « chimie des solides »...	382
<i>VI.2. Révolution instrumentale : caractérisation et informatisation</i>	384
VI.2.1. À nouveaux solides, nouvelles caractérisations physiques.....	384
VI.2.1.1. Dynamique instrumentale en sciences chimiques (1964-1982).....	384
VI.2.1.2. La microscopie électronique entre visions « thermodynamique » et « structurale » : controverse, consensus et conséquences.....	387
VI.2.2. L'informatisation, un autre défi pour le chimiste	396
VI.2.2.1. Bureautique, organisation du laboratoire et publications.....	396
VI.2.2.2. À l'interface numérique/analogique.....	399
VI.2.2.3. Modélisations : vers une chimie prédictive ?.....	401
VI.2.3. Perte de repères identitaires en chimie ou renouveau générationnel ?	404
<i>VI.3. Administration de la recherche : évolutions culturelles, options politiques et contexte économique</i>	408
VI.3.1. Transformation du laboratoire : du cercle familial à l'institut interdisciplinaire	408
VI.3.1.1. L'après Mai 68 au laboratoire.....	408
VI.3.1.2. L'épineuse question des successions mandarinales	419
VI.3.1.3. Trois stratégies d'adaptation organisationnelle (1980-2000).....	426
VI.3.2. Relations industrielles : argent, conseil, brevet et start-up	432
IV.3.2.1. Le lien financier : dépendances et choix politiques	432
IV.3.2.2. La logique industrielle en chimie du solide : entre aiguillon créatif à restriction d'autonomie	433
VI.3.2.3. Politique des brevets : échec conjoncturel ou structurel en chimie du solide ?	437
VI.3.3. Quelles identités en chimie des solides ?.....	443
VI.3.3.1. À propos de migrations individuelles université/industrie	443
VI.3.3.2. La tentation « matériaux », l'exemple du PIRMAT (1982-1994)	445
VI.3.3.3. Essor d'une communauté scientifique ouverte et multiforme	449
<i>Conclusion</i>	456

Introduction

L'émergence de la chimie du solide entre 1950 à 1980 a été décrite comme la construction d'une communauté de chercheurs partageant des rêves et se disputant des moyens. Une matrice disciplinaire (méthodes et instruments) s'est imposée et a normalisé l'étude de solides minéraux (chapitre III). L'homogénéisation s'opère via des exclusions de laboratoires (V.2) ou la remise en cause de groupes thématiques hétérogènes, jugés trop divergents (V.1). Si la communauté semble alors unie par un sentiment identitaire fort, il n'en subsiste pas moins des hétérogénéités irréductibles comme les laboratoires ou les écoles de recherches, qui continuent de se distinguer par des programmes de recherche propres (chapitre IV). Le sentiment identitaire se double à partir des années 1970 d'une institutionnalisation dans le système universitaire. Vers 1980, la chimie du solide s'est ainsi définie comme une discipline scientifique, consciente d'elle-même en interne, et visible par la communauté universitaire. Cette analyse propose l'image claire d'une communauté en construction sur trois décennies (1950-1980) en s'appuyant sur les sources institutionnelles et de nombreux témoignages. Ce faisant, elle place au centre du tableau la chimie du solide « orthodoxe », c'est-à-dire celle des grandes familles scientifiques qui ont dominé l'appareil institutionnel. Or dominer signifie influencer deux fois l'histoire : une première fois, au cours du processus (la mise en place et le choix de la matrice disciplinaire) et une deuxième fois, lors de la sélection des sources (orientation des sources écrites et sélection des cadres actuels, d'où les sources orales). Cette chimie du solide orthodoxe s'appuie principalement sur les solides cristallins, obtenus à haute température, et la diffraction des rayons X.

Que devient cette communauté par la suite ? Telle est la question à laquelle ce chapitre s'efforce de répondre. Rester focalisé sur la seule chimie du solide orthodoxe ne donne qu'une image partielle de la situation et gêne la lecture pour les deux décennies suivantes, de 1980 à 2000. Le brouillage de la lecture disciplinaire n'est pas propre à la chimie du solide mais participe d'un mouvement plus large. Ainsi, le rapport d'activité général du CNRS pour 1973 découpe la chimie en trois domaines : « interactions et interfaces », « matériaux », « moléculaire » [RA CNRS, 1973]. Aucun d'entre eux ne correspond uniquement à la chimie du solide, qui se situerait plutôt à cheval entre les « matériaux » (même si ceux-ci ne sont pas forcément solides ni minéraux) et les « interfaces » (avec les phénomènes de surface qui intéressent parfois les *solidistes*). La non-superposition des rapports institutionnels des années 1970 avec les disciplines universitaires n'est pas due qu'à une rhétorique « matériaux » (III.4.3). Elle est plus vaste puisque l'ensemble des sciences physiques est touché par la réorganisation. Elle semble qualitativement plus profonde aussi : la perméabilité des disciplines expérimentales et leurs interrelations fluctuantes ont été accrues par une homogénéisation des techniques et des méthodes employées pour étudier la matière.¹ Le brouillage est aussi renforcé par une reconnaissance explicite des « sciences pour l'ingénieur » au sein même de la chimie [RC CNRS, 1974]. Le système universitaire se

¹ « La chimie a connu ces 20 dernières années une évolution très importante. En effet, si auparavant chaque discipline chimique avait ses propres techniques et sujets d'étude qui les distinguaient entre elles, à l'heure actuelle, les méthodes et les concepts introduits en chimie présentent une généralité suffisante pour imposer un nouveau découpage, fonction de l'état solide ou moléculaire étudié, et fonction du phénomène analysé. ». À cette occasion, le rapport de conjoncture définit parmi quatre domaines de la chimie particulièrement importants : « la chimie du solide qui traite de l'état solide des matériaux et de leurs surfaces » [RC CNRS, 1974, p. 7].

réorganise donc suivant des axes de recherche – plutôt que suivant les disciplines d’enseignement – et incite fortement à l’interdisciplinarité.²

On peut objecter que la réorganisation n’a pas lieu matériellement et reste un vœu pieux des rapports institutionnels, que la vie des acteurs se déroule encore dans des communautés distinctes et non pas à travers des concepts transversaux. Effectivement, la communauté se réunit et se rassemble toujours autour des « matériaux solides ». Les sections du CNRS restent opérantes. Néanmoins, la fin des Trente Glorieuses redéfinit – en France mais plus généralement en Europe – l’organisation de la recherche scientifique. Désormais, celle-ci se construit de plus en plus sur des objectifs en décloisonnant les structures traditionnelles, dont font partie les disciplines scientifiques. Cette évolution n’est pas sans effet sur les jeunes générations. Les doctorants et les jeunes chercheurs de la chimie du solide se sentent aujourd’hui moins proches de la communauté, ne (re)connaissent plus les « ancêtres », Hagenmuller ou Collongues, et ne se réclament plus complètement du dogme structure-propriétés-applications.³

À partir du début des années 1980, il semblerait que la communauté perde une partie de son influence, son rôle moteur, central et normatif s’amenuise. Elle constitue encore un cadre historique et un support logistique, qui rendent possibles de nouvelles évolutions, mais n’est plus l’acteur principal qu’elle a été pour les années soixante ou soixante-dix. Importante, elle n’est plus suffisante pour raconter les vingt dernières années du siècle. Je ne procéderai pas ici comme précédemment à une reconstruction détaillée de la structure communautaire,⁴ mais l’évoquerai simplement à plusieurs reprises. Ce qui m’intéresse ici, ce sont les mouvements d’ensemble qui caractérisent la période 1970-2000 (et qui pourront parfois dépasser le cadre de la chimie du solide pour caractériser le système universitaire, voire la société).

Pour les saisir, je continue de suivre les acteurs issus de la chimie du solide en utilisant maintenant l’expression « chimie des solides » pour les désigner, ce que je justifierai par la suite. Les communautés scientifiques, malgré un penchant au dogmatisme, n’en demeurent pas moins ouvertes au dialogue. Ainsi leurs systèmes de régulation permettent de nombreux espaces d’autonomie, voire de liberté. Les membres de la communauté profitent de ces espaces pour inventer et diverger par rapport à la matrice disciplinaire. Les trente dernières années sont marquées par un renouveau tous azimuts en synthèse, pour les instruments et l’administration de la recherche. Ce renouveau fait apparaître comme « traditionnelle » ou « conventionnelle » la chimie du solide orthodoxe des années soixante-dix.

Je décrirai d’abord le renouveau de la synthèse des solides à basse température (VI.1), qui brise l’hégémonie des hautes températures en chimie du solide (V.1.2). Cette évolution

² Le rapport de conjoncture de 1974 distingue six « thèmes » (le premier étant « physique et chimie ») dont le sixième est intitulé « Rapports interdisciplinaires » [RC CNRS, 1974].

³ Je n’ai pas étudié l’éloignement des jeunes générations vis-à-vis de la communauté de manière détaillée. Cette impression repose sur quelques témoignages explicites : « *PT : Pour revenir aux disciplines, êtes-vous intégrés à la communauté de chimie du solide en France ?* – JA : Oui, on y est mais c’est plutôt une communauté de vue sur ce que doit être la chimie du solide. Il est vrai qu’au plan scientifique nos interactions ne se font pas avec cette communauté-là » [I Adam, 2006, p. 7], mais aussi sur des discussions informelles avec quelques jeunes doctorants à qui j’ai eu l’occasion de parler lors des visites de laboratoires (2004-2007) ou de la commémoration des 150 ans de la Société française de chimie (SFC) à la Maison de la chimie (16 au 18 juillet 2007) : ils ne connaissent que très rarement les noms de Hagenmuller ou de Collongues (même s’ils sont dans un laboratoire héritier).

⁴ À ce niveau, il est important de souligner que la disparition de la communauté disciplinaire dans les rapports institutionnels généraux est un « fait » historiographique majeur. Si l’historien construit ses « sources », il n’en demeure pas moins dépendant des orientations choisies par les acteurs qui font ou ont fait les sources. Ceci ne signifie pas pour autant qu’ils subissent les sources que les acteurs veulent lui imposer. D’où le recours aux témoignages pour critiquer les rapports institutionnels et vice versa.

chimique s'accompagne de bouleversements instrumentaux induits par la mise sur le marché de nouveaux appareils de caractérisation et de nouveaux moyens informatiques (VI.2). Enfin, je montrerai qu'entrelacées avec ces évolutions scientifiques et techniques sont mises en place des réorganisations de la recherche universitaire que ce soit en interne (laboratoires et politique scientifique) ou en externe (rapports avec l'industrie) et que toutes ces évolutions modifient les sentiments identitaires (VI.3).

VI.1. Synthèses à basse température, de la périphérie vers le centre.

Au cours des années cinquante, la chimie de l'état solide favorisait les synthèses de solides à haute température à la croisée de la métallurgie, de l'industrie et des réfractaires (III.4.1). La décennie soixante a été marquée par le développement de la cristallogénèse, qui requerrait, le plus souvent, de très hautes températures – de un à trois milliers de degrés Celsius –. La communauté de chimie des hautes températures jouait un rôle tellement central que, fort de son succès, elle s'est dissoute dans la chimie du solide (V.1.2). Lors de la mise en place de la matrice disciplinaire, les solidistes ont incorporé les hautes températures comme un « dogme implicite » (V.1) tellement elles étaient évidentes. La plupart des solides minéraux étaient synthétisés par chauffage et les fours occupaient le devant de la scène (IV.1-4). Pour les chimistes de l'état solide, la température ambiante avait été synonyme de chimie des solutions aqueuses à laquelle ils étaient allergiques. Ceux qui, issus de la *Chrétienté* comme Hagemmuller ou Freundlich, passent des solutions aux solides se convertissent rapidement à la voie des hautes températures pour s'intégrer à la communauté (IV.4). Il est alors de bon ton de dénigrer toutes les caractérisations physico-chimiques qui n'ont pas la précision de la diffraction des rayons X.

VI.1.1. À l'ombre des hautes températures : deux études de cas (1950-1970)

À la même époque, des voies de synthèse autres qu'à haute température sont pourtant explorées. On en trouve à température intermédiaire, c'est-à-dire à quelques centaines de degrés Celsius, comme la pyrolyse* ou l'insertion d'éléments liquides ou gazeux dans un solide, ainsi qu'à température ambiante et pression atmosphérique, comme la co-précipitation et l'électrolyse (aqueuse). On a recours à ces températures modérées soit dans d'autres communautés – comme en électrochimie – liées à la chimie du solide mais distinctes d'elle ; soit dans des laboratoires dominants de la chimie du solide, mais de manière marginale ; soit dans des laboratoires « périphériques » de la communauté. Je ne développerai pas le cas de l'électrochimie, ce qui mènerait à l'électrochimie des solutions aqueuses (et non pas aux sels fondus à haute température). En revanche, je décris le cas des phosphates dans un laboratoire dominant, le CECM, et celui de la « méthode des précurseurs » au Laboratoire de chimie minérale de Lyon, qui est marginal à l'époque.

VI.1.1.1. L'étude interdisciplinaire des phosphates au CECM

Parmi les laboratoires dominants, le Centre d'études de chimie métallurgique sert une nouvelle fois d'exemple type même si d'autres laboratoires auraient été possibles.⁵ À Vitry-

⁵ D'anciens élèves de Collongues, Trombe ou Hagemmuller précisent qu'ils faisaient de la synthèse à basse température avant les années 1970 : « même les chimistes du solide comme moi avaient déjà fait de la décomposition thermique d'oxalates, et d'autres le faisaient avant moi. [...] on partait d'un oxalate et on le chauffait avec l'autre parce qu'on savait que l'oxalate allait se décomposer et qu'il allait donner un produit que l'on voulait. » [I Galy, 2006, p. 22]. Au CECM encore, dans l'équipe Collongues, « à l'automne 1958 [...] nous travaillions sur la co-précipitation des oxydes mixtes. » [I Mondange, 2004, p. 4].

sur-Seine, les fours sont au cœur de la plupart des synthèses (II.2). Néanmoins, le « Service de chimie minérale » fabrique certains composés solides à température ambiante. Sous la direction de Robert Wallaey, ingénieur CNRS, le service s'est orienté vers les « phosphates de calcium » dès la fin des années 1940, en particulier les « apatites » [CECM, 1954].⁶ À l'époque, comme les phosphates présentent des structures compliquées, ce sont plutôt les cristallographes qui s'intéressent à eux. Les apatites par exemple sont particulièrement étudiées à l'Institut de cristallographie de Liège.⁷ Dès 1948 pourtant, Wallaey et Chaudron sont présents sur la scène internationale puisqu'ils font une communication au colloque des réactions dans l'état solide sur la « synthèse des apatites par réaction dans l'état solide » [CNRS, 1949b, p. 103-105]. Mais en quoi consistent les recherches du CECM sur les apatites ? Une analyse de la thèse que défend Gérard Montel, le 10 octobre 1956, « Contribution à l'étude des mécanismes de synthèse de la fluorapatite », en donne une excellente image pour les années 1950.

Montel cherche à synthétiser la *fluorapatite*, de formule « $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ » par deux voies différentes. Il fait réagir des fluorures de calcium ou de sodium soit sur des « orthophosphates de calcium [...] en présence d'eau, au voisinage de la température ordinaire », soit sur les produits de pyrolyse des orthophosphates de calcium « par voie sèche, entre 500 et 1000°C ». Le but, clairement exprimé, est atteint : montrer que les produits de réaction présentent des « variations notables » en fonction du type de synthèse utilisée et de paramètres comme la température et le pH. En particulier, le thésard obtient de nombreuses « apatites non stœchiométriques ». Il utilise toutes les ressources de caractérisation dont dispose le CECM : spectres IR pour analyser les liaisons chimiques formées ; diffraction des rayons X pour déterminer la structure cristalline ; micrographie métallographique (grossissement de 25 000 pour les surfaces) ; thermobalance de Chevenard ; diagramme de « diffraction électronique » [Montel, 1956].

Cette thèse, remarquablement condensée en une soixantaine de pages, réalise deux types de synthèse (haute température ou ambiante) et caractérise de multiple façon les produits obtenus. Alors que Wallaey est directeur du service, il n'est remercié que pour avoir « initié à de nombreuses techniques [...] et] fait bénéficier de son expérience dans le domaine des phosphates de calcium » et n'est pas admis – parce qu'il est « ingénieur » ? – au jury de thèse, composé de trois professeurs de la Sorbonne : Chaudron, Bénard et Laffitte. C'est bien Chaudron qui est remercié en tant que « maître » et initiateur du projet. En conclusion, Montel montre comment la présence de « canaux » permet d'« admettre un certaine mobilité de cet ion [fluor] ou de tout autre ion qui est lui est substitué par rapport au reste du réseau et [d']interpréter les propriétés de la fluorapatite précipitée et des composés qui en dérivent. » Il s'agit évidemment du lien structure-propriétés, qui permet d'explorer des questions récurrentes déjà pour Michel, Bénard ou Collongues : « la non-stœchiométrie, la diffusion dans l'état solide et l'action des impuretés sur les propriétés des solides ». On retrouve donc

⁶ Le *Nouveau Petit Robert* [2002] donne la définition suivante pour « apatite », du grec « pierre trompeuse » : « phosphate de calcium en cristaux ou agrégats, à inclusions fréquentes de chlore (*chlorapatite* n.f.), de fluor, de silicium et de terres rares. *L'apatite est utilisée dans les engrais artificiels, l'industrie chimique et celle des pierres fines.* »

⁷ Les spécialistes européens sont M.J. Dallemagne et H. Brasseur, de l'Institut de cristallographie de l'université de Liège, qui présentent deux communications au colloque international sur la réactivité des solides qui se tient à Paris en 1948 : l'une purement chimique, « La synthèse des apatites » de type $3\text{X}_3(\text{YO}_4)_2\text{Z}$ en faisant varier (X, Y, Z) ; l'autre en lien avec une application biologique, « La constitution de la substance minérale de l'os et la synthèse des apatites » [CNRS, 1949b, p. 106-108, 109-116]. Dans leurs travaux, Wallaey et ses collaborateurs mentionnent la primauté de l'équipe belge.

les mêmes idées que pour les oxydes, les métaux ou l'étude des surfaces. Le rêve d'un état solide sans frontières épistémologiques ni sociales se poursuit en *Chaudronnerie*.

Beaucoup plus intéressant ici : l'état solide est encore élargi vers la chimie organique. En effet, Montel conclue ainsi : « Il existe d'ailleurs une analogie intéressante entre cette interprétation [canaux structuraux et mobilité ionique] et les nouvelles conceptions issues de la découverte des "composés d'insertion" en chimie organique. » Si l'analogie est une méthode courante en *Chaudronnerie*, c'est la première fois que la « transposition » interdisciplinaire (II.2.2.1) touche explicitement la chimie organique. Qui plus est, non pas un domaine ancien de la chimie organique, mais une question d'actualité. Qui sont ces composés d'insertion ? En 1955, lors d'une « mise au point » à la Société chimique de France, Montel les présente comme « des composés moléculaires d'un type nouveau », découverts en 1940, par un Allemand travaillant sur l'urée. Certaines molécules organiques – comme l'urée – forment des structures cristallines organisées, qui présentent « des cavités de dimensions telles que les autres molécules peuvent y trouver place » : par exemple le « cétane dans l'urée ». Les cavités sont soit des « canaux dans les structures de l'urée, de la thiourée, des acides choléiques, des cyclodextrines », soit des « cages dans les structures de l'hydroquinone, des hydrates de gaz. » [Montel, 1955, p. 1013]. La quasi-totalité des travaux que Montel cite sont signés par des organiciens allemands.

Cette étude de cas appelle quatre remarques. Premièrement, les chimistes de l'état solide fabriquent aussi des composés solides à température et pression ambiantes, dans l'eau. Deuxièmement, la chimie de l'état solide englobe, selon Montel et Chaudron, certains composés organiques solides comme les « composés d'insertion » auxquels on peut appliquer la méthode structure-propriétés. Troisièmement, le cas particulier présenté rejoint un engouement plus vaste des sciences expérimentales pour les phosphates. Pour la chimie, Jolibois en a été l'un des principaux protagonistes de 1945 à 1954.⁸ À son initiative, l'IUPAC organise en septembre 1954, à Münster (Westphalie), un colloque de chimie inorganique suivant trois directions : « Silicium. Soufre. Phosphates ». Mais Jolibois décède dans les mois qui précèdent le colloque et ce sont Klemm et Chaudron qui co-présideront le colloque. Les phosphates occupent deux des cinq journées. Montel et Wallaëys y présentent deux communications sur les apatites [BSCF, 1956]. Treize ans plus tard, en mai 1967, Montel et Pierre Boullé, ancien élève de Jolibois, co-organisent à leur tour un colloque international du CNRS à Toulouse, sous l'égide de l'inamovible Chaudron. De tels composés solides attirent des scientifiques de communautés bien différentes : cristallographes allemands (von Erich Thilo, Berlin) et physiciens grenoblois (LEPM) sur les déterminations structurales ; ingénieurs de Philips sur les propriétés « luminescentes » ; *minéralistes* de Lyon (J.-C. Merlin), de Toulouse (Montel) ou de Paris (Boullé) sur la synthèse et la physico-chimie des apatites ; chimistes de la catalyse (M. Prettre) sur les propriétés catalytiques ; chimistes intéressés par les échanges d'ions... [BSCF, 1968]. Quatrièmement, les phosphates intéressent les industriels qui financent des recherches universitaires : traditionnellement, l'industrie des engrais⁹ mais aussi médicale – pour d'éventuelles prothèses osseuses – et de haute technologie comme Philips.

⁸ Son biographe, Pierre Boullé, écrit en 1959 une notice nécrologique de Jolibois : Ses « recherches reprennent [en 1945] orientées dans deux directions principales : étude des phénomènes d'électrolyse et chimie des phosphates. » Jolibois décède en 1954 peu avant le congrès de Münster [BSCF, 1959, p. 207-277].

⁹ L. Andrès, directeur général de la Société Potasse et Engrais Chimiques (et vice-président de la Société chimique de France), est l'un des trois co-présidents du colloque de Toulouse. D'autre part, Jolibois a dirigé la Société d'Études pour la fabrication et l'emploi des engrais chimiques (entreprise créée en 1928 par Potasses d'Alsace et le ministère de l'Agriculture) en renforçant ses liens avec l'université. Dans le discours d'ouverture, Chaudron, qui fait un hommage posthume de Jolibois, explicite sa démarche : « Il organisa la recherche d'une manière nouvelle et particulièrement efficace. Les recherches furent confiées à divers laboratoires universitaires

VI.1.1.2. Les oxydes métalliques revisités par la « méthode des précurseurs » au Laboratoire de chimie minérale de Lyon

Après-guerre, la chaire de chimie minérale de la faculté des sciences de Lyon est détenue par René Pâris. Diplômé de l'École supérieure de chimie de Mulhouse (ESCM) en 1930, Pâris effectue sa thèse au Laboratoire de chimie physique de son École, alors dirigé par P. Mondain-Monval. Professeur de l'entre-deux-guerres, celui-ci reste fidèle à la chimie éclectique de la première moitié du siècle (II.1) et multiplie les sujets de recherche. Ancien élève du Laboratoire Le Chatelier, Mondain-Monval soutient une thèse en chimie des sels (1924) puis publie alternativement en chimie des solutions, sur les alliages métalliques (1934) ou la thermodynamique des verres (1935).¹⁰ Il incite ses élèves à rechercher la même diversité et les suit quotidiennement à la paillasse. Ainsi, il charge Pâris de travailler pour sa thèse à une « Contribution à l'étude des alliages ternaires » (1930-1934) mais co-publie aussi avec lui une étude sur les « complexes minéraux » en solution (1934).¹¹ Alors qu'il est doctorant à Mulhouse, Pâris soutient sa thèse à la Sorbonne le 23 avril 1934 devant trois professeurs de la prestigieuse université : Pascal (président) et M. Guichard pour la chimie minérale, Eugène Darmois pour la physique,¹² et son directeur de thèse, Mondain-Monval.

La thèse de l'ingénieur vise à étudier de nouveaux « alliages légers à base de magnésium », qu'il choisit d'associer à du calcium (métal de faible densité mais oxydable) et à du zinc. Le premier objectif est d'établir un « diagramme thermique complet ». Pour ce faire, il synthétise plus de deux cents alliages ternaires dont il analyse la composition chimique et le comportement thermique. En associant cette analyse à une observation des surfaces grâce à un « microscope métallographique Le Chatelier (construit par Leitz-Wetzlar) », il trace le diagramme de phase. La thèse contient près de cinquante clichés métallographiques. Son deuxième objectif consiste à trouver les alliages présentant les meilleures tenues mécaniques. Il opère d'abord à l'œil et à la scie pour s'assurer que la tenue mécanique dépend de la composition chimique. Pour les échantillons les plus prometteurs – les plus riches en magnésium –, il affine les tests mécaniques : « densité », « essais de dureté », « essais de traction », « essais de flexion statique », « essais de résilience » (c'est-à-dire résistance au choc). Le thésard est donc chargé de fabriquer des alliages légers puis il sélectionne et caractérise les échantillons de meilleure tenue mécanique parce qu'il sont « seuls susceptibles de recevoir une application pratique » [Pâris, 1934].

à Paris et en province. Les sujets d'étude sont donnés à des jeunes chercheurs qui poursuivaient en même temps une thèse de doctorat. Les jeunes docteurs, ayant reçu une formation de chercheurs, revenaient alors dans les sociétés du groupe, où ils étaient affectés soit aux ateliers de fabrication, soit aux laboratoires. Ce mode de recrutement d'une partie des cadres industriels s'est révélé excellent [...] un moyen efficace et durable pour assurer une liaison entre la recherche et l'industrie. » [BSCF, 1968]

¹⁰ Mondain-Monval soutient sa thèse sur des « Recherches sur la dissolution saline » en 1924 à Paris. En 1935, il publie un article conséquent de soixante-dix pages aux *Annales de chimie* sur les « Recherches sur l'allotropie et la cristallisation des corps vitreux » (n°3, p. 5-72). Il dirige la thèse de Pâris sur des alliages métalliques.

¹¹ La communication est présentée à l'Académie, à la séance du 19 mars 1934, par Le Chatelier dans la rubrique « chimie-physique » sous le titre « Étude thermométrique de la formation des complexes minéraux » [Mondain-Monval & Pâris, 1934].

¹² D'après les souvenirs d'Anatole Abragam, un étudiant comme les autres en licence de physique à la Sorbonne en 1933-1934, Darmois, futur académicien, assurait le cours d'« électricité » d'une manière « révolutionnaire » (il est ironique) et dirigeait dans les faits le Laboratoire de Charles Fabry à la Sorbonne [Abragam, 1987, p. 49, 66].

Pâris n'utilise pas la diffraction des rayons – c'est d'ailleurs la proposition du jury pour sa deuxième thèse : « Application des rayons X à la métallurgie » –, mais la méthode n'est alors utilisée qu'en de rares endroits, comme à Lille, chez Chaudron, où Michel est en train de l'adapter à l'étude des phosphates justement (II.2.1.3). Le but de la thèse est d'obtenir un alliage léger, mécaniquement et thermiquement résistant. Et il n'est donc pas surprenant que le doctorant soit financé par la « Direction des services techniques de l'aéronautique »,¹³ dépendant du ministère de l'Air. Autre leçon apprise par Mondain-Monval de Le Chatelier : la nécessité d'une « science industrielle » [Letté, 2004]. Ce travail de thèse présente donc les caractéristiques classiques d'un doctorat en métallurgie de l'époque.

C'est en 1948 que Pâris obtient la chaire de chimie minérale à Lyon. Comme universitaire, il restera fidèle à sa formation d'ingénieur et au message de Le Chatelier. Loin de se couper de l'industrie, il valorise la pratique, défend une science intuitive, appliquée à des problèmes concrets plutôt qu'à des équations abscones.¹⁴ Après quelques années, il quitte même temporairement sa place de professeur pour une position de « chef du service de recherches de la Société Péchiney » (1955-1959) tout en siégeant au comité national du CNRS [RC CNRS, 1959, p. 127]. Lorsqu'il réintègre l'université de Lyon en 1960, il prend la direction du Laboratoire de chimie minérale. Tout au long de sa carrière, son enseignement de la chimie reste marqué par ses multiples expériences, pénétré de problèmes pratiques et de sciences appliquées, ce qui a pu fasciner ses étudiants, habitués aux cours magistraux descriptifs, ennuyeux.¹⁵ Le laboratoire poursuit simultanément et de manière équilibrée des recherches en chimie minérale, chimie analytique et chimie physique. En 1966, renommé « Laboratoire de chimie minérale et analytique », il rassemble une vingtaine de chercheurs permanents (dont treize assistants et attachés de recherches) et accueille chaque année une quinzaine de chercheurs français et deux chercheurs étrangers. La diversité disciplinaire sous-tend une instrumentation multiforme : analyses spectroscopiques de molécules (infrarouge, UV, visible, Raman), analyses structurales (rayons X) et thermiques (différentielles) de solides, mesure de conductivité électrique en solution. Pour la seule rubrique chimie minérale, sont étudiés des « éléments » (métaux de transition, familles de l'oxygène et de l'azote), des solutions (chélates, solvants), des produits (« carbone industriel », « produits radioactifs », « ferromagnétiques ») [MIN, 1966a, p. 226-228]. Tout au long des années 1960, le laboratoire a engagé des relations avec Péchiney – où Pâris est toujours conseiller scientifique –, qui dispose d'une « cellule » de recherche au sein du Laboratoire, mais aussi avec Total, probablement sur des questions de « catalyse ».¹⁶

¹³ Dans ses remerciements, Pâris écrit : « Cette étude a pu être poursuivie grâce à l'aide matérielle que nous a accordée la Direction des Services Techniques de l'Aéronautique ; nous exprimons à M. l'Inspecteur Général Seguin, Directeur du Service des Recherches, toute notre reconnaissance. » La thèse que Bastien soutient en 1933 à l'École centrale est tout à fait similaire (II.2.1.3).

¹⁴ En préface d'un ouvrage de thermodynamique chimique qu'il traduit, Pâris écrit en 1965 : l'« objet [de la thermodynamique] tient quelques relations utiles qu'on peut appliquer facilement à des problèmes concrets. Le mérite du Professeur Everett a justement été de démontrer qu'il est possible d'initier les débutants à la thermodynamique chimique en faisant surtout appel à l'intuition et à des raisonnements mécaniques très accessibles. [...] Grâce à ce caractère beaucoup plus utilitaire que spéculatif, cette « Initiation » a été très favorablement accueillie dans les pays de langue anglaise » [Everett, 1965].

¹⁵ « J'ai choisi ce Laboratoire parce que c'est l'enseignant, René Pâris, qui m'avait conquis. C'est quelqu'un qui connaissait bien la chimie générale et minérale mais aussi l'industrie. Déjà, il illustrait ses cours de problématiques industrielles et économiques. Il avait une autre largeur de vue qu'un enseignant qui n'avait jamais quitté son laboratoire universitaire. Ses cours étaient très vivants. » [I Rousset, 2006, p. 2]

¹⁶ De nombreux éléments du récit proviennent de l'interview de l'un des héritiers de Pâris à laquelle j'ai confronté, dans la mesure du possible, les sources institutionnelles citées : « René Pâris venait de l'École de Chimie de Mulhouse. Après son diplôme d'ingénieur il prépara sa thèse dans le Laboratoire du Professeur

En résumé, le laboratoire lyonnais présente une forte dynamique interne et une grande ouverture vers l'extérieur : nombreux effectifs pour l'époque ; beaucoup de jeunes en thèse ; une coloration familiale (Pâris père et ses deux fils : Jacques et Michel) ; cadres plutôt issus de l'université que du CNRS ;¹⁷ vaste réseau instrumental et disciplinaire ; questionnements appliqués et fondamentaux ; relations étroites avec l'industrie des matériaux (Péchiney) et de l'énergie (Total) ; collaboration avec les physiciens du solide de Grenoble (Néel et Bertaut) ; présence de nombreux chercheurs extérieurs (français et étrangers).¹⁸ La dynamique du laboratoire et la diversité des centres d'intérêt sont aussi reconnues par la communauté française. Les membres du laboratoires sont invités à faire des communications dans trois des principaux colloques internationaux liés aux solides qui se tiennent en France au cours des années 1960 : oxydes métalliques à Bordeaux en 1964 (René et Jacques Pâris), phosphates à Toulouse en 1967 (Jean-Claude Merlin et Maurice Porthault), terres rares à Paris-Grenoble en 1969 (René et Jacques Pâris, Georges Szabo, Guy Paris et Bernard Vulliermet).

Un thème en particulier m'intéresse ici : la synthèse d'oxydes métalliques à plus basse température. Dès 1961, Merlin et le doctorant, Jacques Pâris, publient aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences* un article « Sur la pyrolyse de quelques composés organiques du vanadyle », présenté par Champetier en « chimie minérale ». Les auteurs décrivent la préparation de sels organiques – « formiate, acétate, citrate et succinate » de vanadyle – puis leur pyrolyse – étymologiquement, décomposition d'un corps sous l'action du feu –. La première étape – préparation de sels organiques – est connue depuis le début du siècle.¹⁹ En revanche, la « pyrolyse de ces composés organiques » est, « semble-t-il », inédite. Elle « conduit à des oxydes qui se révèlent, à l'analyse aux rayons X, stœchiométriques ou non, amorphes ou finement cristallisés ». Les chercheurs suivent la réaction « par analyse thermogravimétrique » en utilisant, soit une thermobalance de Chevenard, soit une thermobalance Ugine-Eyraud. Les produits de décomposition du formiate de vanadyle sont « particulièrement intéressants », ce qui pousse les auteurs à détailler les conditions expérimentales (température, pression, temps) :

Expérience	Vide (mm Hg)	Température (°C)	Oxyde obtenu
1	10 ⁻³	250	Amorphe, oxydable à l'air
2	10 ⁻¹	450 (12h)	VO ₂ finement cristallisé
3	10 ⁻²	800	VO _{1,85}
4	10 ⁻³	850	VO _{1,60}

Mondain-Monval. [...]. René Pâris fut le premier titulaire de la Chaire de Chimie Minérale de l'Université de Lyon (1948). Il fut aussi Directeur des Recherches chez Péchiney, de 1955 à 1959, et garda des fonctions de Conseiller Scientifique très longtemps dans cette société après avoir réintégré l'Université de Lyon ce qui vous explique que notre laboratoire était très orienté non seulement vers les physiciens mais aussi vers l'industrie. Dans le Laboratoire de Chimie Minérale de Lyon, il y avait une cellule Péchiney avec plusieurs thésards, des ingénieurs et des techniciens. La Société Total avait également en permanence des doctorants au labo, dans les années 60. Il y avait déjà de nombreux thésards de l'industrie dans le laboratoire Pâris ce qui devait être assez rare en France à cette époque-là. » [I Rousset, 2006, p. 2].

¹⁷ Le laboratoire dispose de six cadres de l'université : deux « professeurs » (Pâris père et Jean-Claude Merlin), une « maître de conférences » (M^{lle} Germaine Thomas), trois « maîtres-assistants » (Paul Pierron, Michel Pâris, Paul Clechet) contre seulement deux « chargés de recherche » du CNRS (Maurice Porthault, Jacques Pâris) [MIN, 1966a, p. 227].

¹⁸ En 1965-1966, le laboratoire lyonnais accueille quinze chercheurs français et deux étrangers par an. Pour comparaison, le Laboratoire de chimie minérale de Bordeaux, qui regroupe déjà trente-trois chercheurs (soit douze de plus), accueille seulement dix Français et deux étrangers par an [MIN, 1966a, p. 219].

¹⁹ « Il est inutile d'insister sur la préparation de ces complexes organiques [de type A₃[M^{III}(C₂O₄)₃] avec A^I tel que H⁺, NH₄⁺, Na⁺, Li⁺... et M^{III} tel que Al³⁺, Cr³⁺, V³⁺...] qui résultent de la syncrystallisation en proportions convenables de sels trioxaliques connus déjà depuis une cinquantaine d'années. » [Pâris & Pâris, 1965, p. 1138].

La température maximale de chauffage est 850°C, ce qui est déjà sensiblement plus bas que les températures évoquées au chapitre IV. Qui plus est les deux chercheurs lyonnais soulignent l'intérêt particulier « en raison de sa très grande réactivité » du composé amorphe (V_2O_3), qui est lui obtenu à 250°C seulement [Pâris & Merlin, 1961]. Ils ont en tête la même idée que Montel : le mode de synthèse détermine le produit de la réaction, en particulier ses propriétés chimiques.

Après ces premiers résultats encourageants, Jacques décide de poursuivre la synthèse d'oxydes métalliques par décomposition de sels organiques. Après sa thèse (1963), il lance un petit groupe de chimie du solide à basse température au sein du Laboratoire.²⁰ En 1964, son père et lui sont invités à présenter les résultats du Laboratoire au congrès de Bordeaux. C'est probablement René, le père, qui présente oralement l'« obtention d'oxydes mixtes et de solutions solides d'oxydes par décomposition de complexes organiques mixtes ».²¹ Dans une introduction très claire, il distingue les deux méthodes « très classiques » de synthèse d'oxydes métalliques : 1°) la « plus courante » se passe à haute température, par mélange d'oxydes solides, afin de fabriquer des « phases bien cristallisées destinées par exemple aux études de structures » ; 2°) « moins généralisée, [la] calcination de co-précipités d'hydroxydes ou de sels organiques » à température intermédiaire. Selon lui, la première méthode présente des inconvénients (température élevée, réaction complète, difficultés de mélange) que la deuxième évite par « de meilleures conditions de réaction entre phases grâce au mélange intime de particules fines ». Autre avantage appréciable : les produits obtenus sont différents, « plus réactifs, présentant par exemple des propriétés catalytiques améliorées du fait de leur obtention à plus basse température. » Pâris relève cependant trois inconvénients : pas applicable à tous les oxydes, nécessité de chauffer pour séparer le mélange des produits, présence finale d'« impuretés ».

En situant son travail dans la deuxième voie – basse température et réactifs organiques –, il s'en démarque pourtant, dit-il, par l'obtention directe des produits voulus (sans réchauffage). Il ne revendique pas une primauté pour la méthode générale mais pour avoir soulevé l'intérêt d'utiliser comme réactif un composé « mixte » plutôt qu'un mélange de composés.²² Afin de convaincre l'auditoire, il compare pour quatre oxydes courants ($MgCr_2O_4$, sesquioxides de fer et de chrome, solutions solides de ThO_2 et UO_2 , de Co_3O_4 et $CoAl_2O_4$) la méthode classique (au-delà de 1000°C) à la décomposition des sels organiques (autour de 500°C). En conclusion, il précise n'avoir fait qu'effleurer le sujet – lui et ses collaborateurs n'ayant choisi que des sels bien connus – mais laisse entrevoir les potentialités

²⁰ « Dans le laboratoire Pâris, il y avait un petit groupe autour de son fils Jacques qui faisait de la chimie du solide mais on était les premiers, il n'y avait pas d'antériorité, les thèses qui avaient été faites avant au laboratoire n'étaient pas des thèses de chimie du solide. Les autres groupes travaillaient plutôt sur la chimie de coordination, la chimie analytique. » [I Rousset, 2006, p. 2]

²¹ Deux éléments pour soutenir l'assertion : c'est souvent le chercheur le plus ancien – expérimenté – qui a le privilège d'être orateur dans ce type de congrès ; dans les questions, seul René Pâris répond à une question (Jacques ne parle pas).

²² « Il semble que certains auteurs aient déjà, avant nous, soupçonné l'intérêt de ces composés mixtes pour préparer commodément des produits intéressants : on relève en effet, dans certains articles ou brevets relatifs à la fabrication de ferrites, qu'il est avantageux de partir d'oxalates, de formiates, d'acétates « mixtes » des différents métaux. Or, dans ces travaux, le caractère « mixte » des produits engagés [il veut dire réactifs] n'a jamais été démontré et les techniques décrites laissent généralement penser que l'on a mis en œuvre, dans ces préparations, des mélanges d'individualités cristallines diverses, dont la décomposition, chacune pour son compte, avait conduit à des mélanges d'oxydes » qu'il s'agissait de chauffer ensuite à haute température pour obtenir le produit mixte voulu [Pâris & Pâris, 1965, p. 1138].

énormes que recèle la pyrolyse des sels organiques.²³ Leur intérêt est triple : synthèses « à températures relativement basses » ; obtention possible de phases nouvelles, plus réactives, « solutions solides relativement instables » ou « amorphes » ; maîtrise du « grain de la phase », c'est-à-dire de la réactivité des produits fabriqués.

Quelle est la réception d'un tel discours ? La réponse n'est pas simple. Si, avant le congrès, les Pâris ont été invités à faire une communication, c'est que leur contribution a été jugée suffisamment intéressante par les organisateurs (en particulier Hagenmuller), eux-mêmes influencés par la communauté (Bertaut ?). Sur le coup, comment la salle réagit-elle aux paroles de Pâris père ? Plutôt bien à première vue, puisque cinq personnes prennent la parole pour préciser certains points. Le premier à parler, Collongues, insiste sur la complémentarité de la méthode envisagée par Pâris avec la « coprécipitation » – que Stöcker, l'un de ses étudiants, a bien décrite dans le cas des solutions solides d'oxydes de terres rares dans la zirconite (1958) –. Pâris rétorque qu'il n'y a pas complémentarité parce que l'emploi de l'une ou de l'autre dépend vraiment des cas. Wold précise ensuite que la « *technique of precursors* » a déjà été utilisée – par lui et ses collaborateurs – pour synthétiser des chromites et ferrites. Roy renchérit sur Collongues en insistant à son tour sur une continuité qui conduit de la pyrolyse à la coprécipitation en passant par l'hydrolyse et attire l'attention sur ses propres travaux (1955-1956).²⁴ Il précise aussi l'intérêt qu'il y a à travailler sur la « *perfection* » des cristaux et pas seulement sur leur taille afin de mieux caractériser les propriétés électriques et magnétiques en citant des travaux de Philips ou du *Lincoln Laboratory*. Puis M. Görter, professeur à Leyde, insiste sur l'apport bénéfique de la « "*precursor*" *method* » tout en mettant en garde contre la tentation de croire qu'elle conduit nécessairement à des composés homogènes. Enfin, J.-M. Trautmann, du Laboratoire dirigé par Forestier à Strasbourg, mentionne deux méthodes de préparation d'oxydes mixtes à « température ambiante » : par « oxydation anodique » (électrochimie) et par l'« oxydation d'un coprécipité d'hydroxydes bivalents de fer et d'un métal M [pour mener au] ferrite Fe_2MO_4 », qu'il a lui-même publiées (1963 et un autre article à paraître).

La discussion qui suit la communication est intéressante à plusieurs niveaux. Premièrement, les intervenants mettent les propos de Pâris en relation avec d'autres travaux, en particulier pour quatre d'entre eux avec leurs propres travaux (Collongues, Wold, Roy, Trautmann). Chacun écoute l'orateur avec son point de vue en tête puis parle en recentrant le débat sur lui-même – ce qui est très courant dans tous les congrès –. Aucune intervention n'est vraiment dithyrambique pour Pâris, même si Görter – le seul à ne pas parler de ses propres publications – insiste sur « *the welcome addition* » de la méthode. Ainsi, les interventions tendent d'abord à relativiser les propos de Pâris et à minimiser l'importance de la méthode qu'il propose. Lui-même d'ailleurs n'avait pas parlé de rupture avec la tradition mais de nouveauté. Ce faisant, elles montrent qu'il existe une littérature sur la synthèse de solides à plus basse température et un intérêt de la communauté, en France et à l'étranger. En anglais,

²³ « Les complexes auxquels nous avons fait appel sont d'obtention faciles ; à partir de composés de base, connus généralement depuis le début du siècle, nous n'avons eu aucune peine à procéder à des substitutions évidentes pour synthétiser les composés souhaitables. La généralisation d'une telle méthode est possible car nous avons de bonnes raisons de penser qu'on peut toujours réaliser une association particulière de cations dans une combinaison complexe dont la pyrolyse fournira l'oxyde désiré. On connaît la diversité des composés de coordination. » [Pâris & Pâris, 1965, p. 1140].

²⁴ « *There is a complete transition between pure pyrolysis methods through hydrolysis methods to coprecipitation methods. M. Pâris has added another tool to low temperature methods of reaction. Methods which provide low temperature reactivity suffer either from being restricted to too few systems, or not giving sufficiently reactive materials. May I also refer you to some of our earlier work [1955-1956] on very generalized methods of starting with organo-metallic compounds mixing in alcoholic solution – and various nitrates may be added at this stage. The mixture is hydrolyzed to a gel and dehydrated.* » [Pâris & Pâris, 1965, p. 1141].

les expressions « *precursor method* » et « *technique of precursors* » semblent courantes. La « co-précipitation » est une méthode très répandue en France.²⁵ Pâris avait d'ailleurs introduit son propos en précisant que la « calcination de co-précipités d'hydroxydes ou de sels organiques [...] tend à se répandre depuis quelques années ». Troisièmement, les deux Français qui prennent la parole (surtout Collongues) sont dans des laboratoires dominants (de la *Chaudronnerie*), qui étudient les synthèses à basse température de manière annexe (VI.1.1.1.).

Est-ce à dire que le message de Pâris est entendu ? Après-coup rien n'est moins sûr. En effet, au cours des années soixante, le dogme central reste centré sur les hautes températures. L'avènement du lien structure-propriétés requiert une analyse structurale de plus en plus poussée, qui nécessite l'élaboration de cristaux bien cristallisés. Or, de meilleures cristallisations et la cristallogenèse se font à très haute température. Pour les barons de la chimie du solide naissante, la diversité de synthèse que pourraient induire les basses températures pèse moins lourd que la perfection cristalline permettant d'étudier la relation structure-propriétés. C'est en tout cas le point de vue défendu par l'école Pâris, à travers le témoignage de son principal héritier, Abel Rousset,²⁶ impression que je partage (V.1). La chimie des « grains fins » n'est pas alors considérée comme de la chimie du solide suivant la matrice disciplinaire. Le Laboratoire de chimie minérale et analytique de Lyon, même s'il appartient à la communauté, se situe donc plutôt en « périphérie » à cause de ses composés exotiques et de ses orientations méthodologiques divergentes (maîtrise de la taille des grains). À la marge parmi les chimistes, le Laboratoire collabore activement avec les physiciens de Grenoble comme le montre l'une des thèses du laboratoire : « Contribution à l'étude des oxydes simples et mixtes de fer, de chrome et d'aluminium », défendue par Rousset à la fin des années 1960.

Soutenue devant Néel, Teichner, collaborateur de Prettre à l'Institut de recherche sur la catalyse (IRC), Michel, René (président) et Jacques Pâris (directeur de thèse), la thèse de Rousset intéresse chimistes et physiciens. Le domaine des oxydes a été largement étudié par les Français et en introduction, Rousset s'excuse presque d'y revenir une nième fois. Il justifie son travail par deux nouveautés chimiques majeures. Premièrement, la méthode des précurseurs permet d'étendre le domaine d'existence de certains oxydes mixtes de fer et d'aluminium. Ce faisant, elle remet en cause les limites de substitution connues jusqu'alors de fer par l'aluminium et met en défaut le chapitre correspondant du *Pascal* [1967], la « bible » des *minéralistes* français. Le chapitre en question, sur les sesquioxydes de fer, a justement été rédigé par Michel (avec une bibliographie arrêtée en 1964). À contrecœur, celui-ci, ardent défenseur des hautes températures, se laisse convaincre pour participer au jury de thèse. La personnalité de Néel, qui a donné son aval aux résultats de la thèse, en impose probablement

²⁵ « Coprécipitation que tout le monde faisait à l'époque, on a toujours fait ça aussi. – PT : Dès les années 60 ? – AR : Oui, c'était déjà classique. » [I Rousset, 2006, p. 6].

²⁶ « Quand je préparais ma thèse, je sentais bien qu'il y avait différentes "écoles" qui se faisaient une "rude" concurrence. Il y avait en premier lieu Hagenmuller à Bordeaux qui était le grand patron de la chimie du solide française puis Collongues à Paris. Michel et Bénard plus âgés perdaient peu à peu de leur influence alors que celle de Rouxel (élève de Hagenmuller) à Nantes s'affirmait. Tout cela était bien difficile car nous étions un peu en franc-tireurs par rapport à eux. Le laboratoire lyonnais de Pâris n'était pas reconnu par les branches Hagenmuller, Collongues, Michel notamment. Il y avait beaucoup de réticences à reconnaître l'activité qui se faisait à Lyon. Si vous voulez, c'était l'époque de l'élaboration de monocristaux et il fallait en déterminer les structures. À Lyon, notre chimie était celle des grains fins, une chimie complètement différente de ce qui se faisait ailleurs. » [I Rousset, 2006, p. 12-13] Cet ostracisme mou est confirmé par le fait que quasiment aucun des témoignages héritiers de Hagenmuller ou Collongues n'a mentionné le travail des Pâris et de Rousset, sauf Tournoux à Nantes et Galy (qui se trouve dans la même ville que Rousset et à qui j'en avais parlé d'abord).

au chimiste.²⁷ Deuxièmement, l'auteur souligne que les phases obtenues présentent une « réactivité exceptionnelle [...] en raison de la finesse du grain cristallin [...] ou] due à leur état amorphe » [Rousset, 1969, introduction et conclusion]. Ces deux premiers points (chimiques) constituent les leitmotivs du laboratoire Pâris depuis le début des années 1960. Ce qui change ici, c'est la caractérisation physique utilisée et la « collaboration » qu'elle nécessite. La diffraction des rayons X, outil de base des solidistes français des années 1960, 1970, est mise en défaut par ces phases divisées : la taille des grains cristallins étant trop faible, la diffraction X donne des « clichés blancs », comme si les phases étaient amorphes. Désarmés face à ces grains trop petits pour leurs instruments, les chimistes vont recourir au savoir-faire des physiciens et collaborent avec le service de Bertaut (LEPM), dans lequel « Monsieur Germe » manipule la « diffraction électronique ». La diffraction électronique est ici plus appropriée parce qu'elle permet une meilleure précision : comme la longueur d'onde* associée des électrons accélérés « sous une tension de 50 kilovolts » est quarante fois plus petite – de l'ordre de 0,054Å – que celle des rayons X ($\lambda = 2,2909\text{\AA}$ pour la radiation K_{α} du chrome), l'onde électronique est diffractée par des objets plus petits et donne donc des informations sur ces objets.²⁸ Interagissant avec des objets plus petits, le faisceau électronique permet donc d'étudier la structure de ces « grains fins » ou « cristallites de faibles dimensions » dont la taille est de « quelques centaines d'angströms » (d'où le spectre blanc avec les rayons X). C'est donc par le recours à un instrument de caractérisation au delà de la portée des chimistes jusque-là, la diffraction électronique, que les Lyonnais parviennent à convaincre les tenants des hautes températures – comme Michel – du bien-fondé de leurs résultats. L'aide des physiciens est indispensable parce que la mise au point, la préparation des échantillons et l'interprétation des résultats exigent un savoir-faire délicat dont les chimistes ne disposent absolument pas.²⁹

Dans cette affaire, les Grenoblois s'intéressent non seulement à la détermination structurale de nouvelles phases finement divisées (plutôt l'équipe Bertaut) mais encore aux propriétés « magnétiques » de ces oxydes mixtes. En parallèle à la thèse de Rousset, un jeune physicien, Paul Mollard, travaille sur les mêmes composés avec des aptitudes différentes : c'est lui par exemple qui réalise les « mesures magnétiques ». Au passage, ces mesures permettent de déterminer la pureté du produit obtenu. *In fine*, il s'agit pour Néel de tester certaines de ses « théories sur le superparamagnétisme et le superantiferromagnétisme » sur

²⁷ Michel « avait bien voulu accepter de reconnaître l'existence de certaines phases mises en évidence dans ma thèse alors qu'il avait malheureusement écrit le contraire dans *le Pascal* (la bible des chimistes). Or, j'avais démontré que ces phases pouvaient être synthétisées et le laboratoire de Néel l'avait confirmé grâce à des études magnétiques. C'était difficile à envisager pour Michel mais après avoir beaucoup discuté il a accepté d'être dans mon jury. » [I Rousset, 2006, p. 13]. Par exemple, Rousset écrit en conclusion de sa thèse qu'il obtient une phase « $\gamma - (\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x)_2\text{O}_3$ » avec $0 < x < 0,50$. Or, Michel avait écrit quelques années plus tôt que la « substitution de $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Al}^{3+}$ » était limitée à 9 ou 10% suivant les cas ! [Pascal, 1967].

²⁸ « Au cours de notre étude, il nous est arrivé bien souvent, même en travaillant avec un monochromateur et avec des temps de pose de l'ordre d'une vingtaine d'heures, d'obtenir des clichés de diffraction X ne présentant aucune raie (clichés blancs). Soupçonnant alors une organisation cristalline limitée à de très faibles domaines nous avons fait appel à la diffraction électronique. [...] L'appareil utilisé était un diffractographe Trub-Tauber KD 3 permettant d'accélérer les électrons sous une tension de 50 kilovolts. Leur longueur d'onde associée est alors de l'ordre de 0,054Å. » [Rousset, 1969, II.2.1].

²⁹ Au début de sa thèse, le doctorant remercie « Monsieur J. Comes [du LEPM] pour l'aide constante qu'il nous a apporté dans la réalisation technologique des dispositifs mécaniques que nous avons utilisés. » « Pour obtenir des clichés portant sur l'ensemble de la poudre les spectres ont été effectués par réflexion, car dans de tels problèmes la microdiffraction est beaucoup trop localisée et des erreurs d'interprétation peuvent en découler, d'autant plus grave que le matériau pulvérulent est plus hétérogène. Les poudres étudiées sont collées par pression sur l'extrémité d'un cylindre métallique en laiton qui est placé dans l'appareil de telle façon que le faisceau d'électrons arrive tangentiellement à la surface plane recouverte de poudre. » [Rousset, 1969, II.2.1].

des solides concrets³⁰ : la matière des chimistes au secours des spéculations physiques ! Après sa thèse, Rousset, malgré des velléités de postdoc, reste au Laboratoire Pâris et dispose rapidement d'une petite équipe pour finaliser ses recherches vers l'« enregistrement magnétique », alors sujet à la mode. Aidé par l'ANVAR, il essaie de produire des applications intéressant l'industrie.³¹ La collaboration entre Lyon et Grenoble profite donc aux deux parties et permet aux chimistes lyonnais d'être reconnus au sein de leur communauté.³²

Au cours des décennies cinquante puis soixante, la synthèse de solides à basse température (jusqu'à quelques centaines de degrés) est minoritaire dans le réseau de chimie de l'état solide puis au sein de la communauté de chimie du solide. La co-précipitation à température ambiante est une pratique courante, mais peu médiatique, parce qu'elle est considérée comme trop facile. La « méthode des précurseurs » organiques et la synthèse par voie aqueuse à température et pression ambiantes restent des cas périphériques jusque-là. C'est le temps des hautes températures et des monocristaux triomphants ! Les choses vont changer à partir des années soixante-dix. Le phénomène le plus marquant pour la chimie du solide – en termes de synthèses à température ambiante – est la mise en place d'une « chimie douce ». Je ne chercherai pas, comme pour la chimie du solide, à suivre la construction d'une communauté. J'en propose simplement une définition en acte avec quelques laboratoires qui la pratiquent (VI.1.2.1) en soulignant quelques étapes historiques marquantes et une répartition géographique de base (VI.1.2.2). Cette présentation permet de s'interroger ensuite sur les conditions historiques d'une telle émergence (VI.1.3).

VI.1.2. De l'ombre à la lumière, l'émergence de la « chimie douce » (1970-2000).

³⁰ « Dans le cadre de cette collaboration, nous avons bénéficié des travaux de Monsieur Mollard pour ce qui est des études magnétiques ». « Les propriétés magnétiques particulières dues à leur état de division ont été observées notamment sur les solutions solides $\alpha - (\text{Fe}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_3$. Les mesures magnétiques ont également permis d'apprécier le degré de pureté de nos produits. » [Rousset, 1969, remerciements, conclusion] « Nous avons travaillé avec le Laboratoire de Louis Néel à Grenoble et mis au point de nouveaux matériaux, qui étaient déjà des nanomatériaux magnétiques, des grains fins, destinés en particulier à vérifier les théories que Néel avait élaborées sur le superparamagnétisme et le superantiferromagnétisme. Ces matériaux ont donc servi à vérifier certaines de ces théories et au-delà à mettre en place des matériaux intéressants pour l'enregistrement magnétique. [...] À Grenoble, l'élève du Professeur Néel avec qui je travaillais était Paul Mollard, le physicien avec lequel j'ai continué à travailler pendant plus de 25 ans, même après être arrivé à Toulouse. » [I Rousset, 2006, p. 1].

³¹ « Je suis resté parce que, suite à ma thèse, nous avons eu des contrats avec l'ANVAR concernant les matériaux pour l'enregistrement magnétique. Cette thématique, sous l'impulsion de Néel, prenait une très grande importance et, tout de suite après ma thèse, j'avais déjà un petit groupe de recherche avec deux ou trois personnes dont deux thésards autour de moi. J'étais pris dans un engrenage pour développer mes recherches. Je sentais que les travaux que j'avais menés durant ma thèse avaient un certain écho et qu'il fallait poursuivre le plus rapidement possible » [I Rousset, 2006, p. 2-3].

³² « Entre les laboratoires de Grenoble et de Lyon, il y avait d'autres collaborations que la vôtre ? – AR : Assez peu, mais celle-là était la principale. Il y en avait quelques-unes avec E.F.Bertaut, directeur du Laboratoire de Cristallographie de Grenoble dont vous avez peut-être entendu parler. Bertaut s'intéressait à beaucoup de phases nouvelles, en particulier des nitrures, des carbures, des oxydes » « C'est à partir de là [1969] que le laboratoire de Lyon s'est fait reconnaître. » [I Rousset, 2006, p. 1-2, 13].

VI.1.2.1. Chimie douce entre « précurseurs » et « insertion », une dualité trompeuse ?

La « chimie douce » peut être définie comme une chimie du solide à température ambiante.³³ En France, elle s'est principalement constituée autour de deux entités cognitives dont la démarcation est revendiquée par les acteurs eux-mêmes : chimie des « précurseurs » d'un côté (ou « précurseurs moléculaires »), chimie d'« insertion » de l'autre (ou « précurseurs liquides »). Probablement opérante aussi à l'étranger, cette distinction est renforcée en France par un découpage social correspondant à deux chefs de file charismatiques qui l'ont en partie façonnée : Jean Rouxel et Jacques Livage.³⁴ Or, si le premier est l'un des tout premiers étudiants de Hagenmuller, le second apparaît souvent comme l'« héritier » de Collongues. La chimie du solide n'en finit pas de se construire en France sur la dualité traditionnelle qui opposait *Chrétienté* et *Chaudronnerie*. Comme dans le cas de la chimie du solide (chapitre III), la cristallisation d'un découpage autour de deux individualités chargées d'un héritage « familial » se nourrit évidemment d'un besoin culturel en généalogies et hiérarchies. Cette dualité fonctionne en première approximation.

À y regarder de plus près pourtant, la généalogie se brouille sensiblement pour les deux protagonistes. En octobre 1961, Rouxel présente sa thèse *Sur deux nouvelles familles de composés de l'aluminium : les oxyhalogénures et les thiohalogénures* à Bordeaux [Rouxel, 1961]. Servant (professeur de physique à Bordeaux), Chrétien, Raymond Calas (organicien) et Hagenmuller composent son jury. Son travail est caractéristique des recherches entreprises à Rennes chez Hagenmuller (IV.4.1.1) : synthèse de cristaux à quelques centaines de degrés (550°C), décomposition thermique (450°C), purification et détermination structurale (avec l'aide d'Antoine Hardy) [Rouxel, 1961]. Il s'appuie, entre autres, sur deux méthodes développées par Flahaut dans sa thèse [1951]. Après un an de service militaire en Algérie, il obtient un poste de maître de conférences en 1963, dans la toute jeune faculté des sciences de Nantes. Là se pose la question du choix des recherches à entreprendre. Sans doute conseillé par Hagenmuller avec qui il reste très lié, Rouxel commence à travailler sur « sujet bizarre, les ammoniacates ».³⁵ Après avoir exploré ce sujet pendant quelques temps, il se révèle décevant et Rouxel se tourne alors vers les sulfures métalliques, dont Flahaut est le spécialiste français.³⁶

³³ « la chimie douce est une des techniques qui permet d'obtenir des composés dans des conditions telles qu'on ne les obtiendrait pas à haute température. La chimie dite *check and melt*, vous mélangez des poudres et vous chauffez, existe toujours mais il y a maintenant des méthodes d'électrochimie, de sol-gel... » [I Etourneau, 2005, p. 13]. « Je définis la chimie douce comme la chimie du solide faite en solution à température ambiante. Parfois, il faut même refroidir par rapport à l'ambiante. » [I Ouvrard, 2006, p. 9]. « C'est de la chimie classique avec des bechers mais pas de haute température. » [I Boilot, 2000, p. 3].

³⁴ « Rouxel était considéré comme le père de la chimie douce. Il y en avait d'autres bien sûr : Jacques Livage à Paris, qui d'ailleurs venait faire des conférences ici. » [I Lefrant, 2006, p. 13]. La chimie douce « a été développée selon deux voies par essentiellement trois personnes : Jacques Livage pour les sol-gels et à Nantes par Jean Rouxel et Michel Tournoux (chimie d'intercalation – désintercalation et chimie douce acido-basique, à laquelle on peut rattacher aussi le nom de Michel Figlarz à Amiens). » [I Pouchard, 2004, p. 25].

« Rouxel avait coutume de distinguer deux classes de composés en chimie du solide :

- à précurseur moléculaire (par précipitation)
- à précurseur liquide comme les argiles ce sont les composés d'intercalation. » [I Livage, 2004, p. 4]

³⁵ « Rouxel, quand il est arrivé à Nantes, a d'abord travaillé sur un sujet bizarre, les ammoniacates. Ses chercheurs travaillaient en utilisant des tubes scellés avec des amidures, des imidures et des nitrures dans l'ammoniac liquide. » [I Tournoux, 2006, p. 9].

³⁶ « *PT* : Comment y est-il venu ? – *MT* : Ah comment est-il venu à ce sujet ? Dans l'histoire de la chimie du solide, il y a un grand chimiste qu'on néglige et dont on parle peu, c'est Jean Flahaut, dont le groupe était isolé à

Lui et ses premiers étudiants – en particulier Raymond Brec – tâtonnent, fouillent et finissent par tomber sur des « composés lamellaires » de sulfures. La structure cristalline des lamellaires n'est pas tridimensionnelle mais bidimensionnelle et peut être décrite comme une superposition de plans atomiques. Le plus étudié d'entre eux est alors le graphite. À Mulhouse (1951) puis à Nancy (1960), Albert Hérold, ancien étudiant de Hackspill, s'est lancé sur le sujet au début des années cinquante.³⁷ Entre les feuillets du graphite, espacés de quelques angströms, il est possible d'intercaler des éléments plus électropositifs ou plus électronégatifs que le carbone. Cette intercalation s'accompagne d'une réaction d'oxydo-réduction* durant laquelle l'élément électropositif cède son électron à l'élément électronégatif. Inspiré par les travaux précurseurs des Allemands (en particulier Rüdorff), Hérold s'est d'abord intéressé aux « composés d'insertion » des métaux alcalins dans le graphite [I Hérold, 2007]. Le graphite est alors un domaine de prédilection des physico-chimistes dont Adolphe Pacault à Bordeaux est le chef de file français, à travers le Groupe français d'étude des carbonés (GFEC).³⁸ Les sulfures, plus électronégatifs que le graphite, sont toujours accepteurs d'électrons mais peuvent intercaler des métaux, plus électronégatifs, comme les éléments de transition.³⁹

Par son orientation vers les sulfures métalliques de « basse dimensionnalité » à partir du milieu des années soixante, le travail de Rouxel se place à la conjonction de deux traditions des minéralistes français : la chimie d'insertion du graphite et la chimie des sulfures métalliques que respectivement Hérold et Flahaut ont défrichés au cours des années cinquante. Cette conjonction s'avère fructueuse, Rouxel est un chercheur brillant⁴⁰ qui ouvre avec ses élèves un champ de recherche très intéressant.

Diplômé de l'École nationale supérieure de chimie de Paris en 1960 [ENSCP, 2005], Livage commence une thèse avec Montel au CECM.⁴¹ Entre-temps, celui-ci obtient un poste de professeur à Toulouse et rejoint la Ville rose sans attendre. Le doctorant ne reste pas seul longtemps et trouve rapidement un nouveau directeur de thèse, Charles Mazières, qui vient de soutenir son doctorat ès sciences physiques en 1961. Mazières a mené au Laboratoire de chimie générale du CNAM, sous la direction de Mondain-Monval, une « Étude, sur microéchantillons, des phénomènes thermiques liés aux transformations structurales ». Il a associé une analyse thermique différentielle microscopique « μ -ATD » à une étude structurale

la faculté de pharmacie, à Paris. Flahaut a débroussaillé pas mal de choses dans le domaine des chalcogénures. » [I Tournoux, 2006, p. 9].

³⁷ « Au laboratoire, on essayait de maîtriser les procédés d'intercalation. En France, il y avait l'école de Nancy dirigée par Hérold qui travaillait sur les graphites et pour les chalcogénures, il y avait Rouxel à Nantes, mes deux thèses portaient là-dessus [1972-1976]. » [I Ouvrard, 2006, p. 2].

³⁸ « à Grenoble, des électrochimistes mais aussi des chimistes ; à Orléans ; à Bordeaux, en chimie physique. Chaque année, nous organisons une réunion nationale en mars, qui réunissait les différents laboratoires et il existait un Groupe français des composés d'insertion. Nous appartenions aussi au Groupe français d'étude des carbonés (GFEC) sur lequel il s'est d'ailleurs un peu inspiré, plus tourné vers la physico-chimie. Le Groupe a longtemps été dirigé par un grand professeur, Adolphe Pacault – que je connais très bien –, à Bordeaux avec des gens comme Marchand, Delahes... Au sein de ce Groupe, l'insertion n'était pas très importante. » [I Hérold, 2007, p. 7].

³⁹ « Contrairement au graphite, les chalcogénures sont pratiquement toujours accepteurs d'électrons (et non pas donneurs) mais comme ils sont des accepteurs plus forts, ils permettent d'insérer des métaux autres que les alcalins ou alcalino-terreux : Ti, Zr, Hf... » [I Hérold, 2007, p. 6].

⁴⁰ « PT : Est-ce que Jean Rouxel était sur les mêmes thèmes que vous ? – AH : À Nantes, Rouxel est parti environ dix ans après nous et s'est intéressé à l'insertion de métaux alcalins dans les chalcogénures lamellaires : sulfures, séléniures, tellurures. » [p. 6] « Le décès prématuré de Rouxel a été une perte énorme pour la chimie minérale française : c'était vraiment un chimiste exceptionnel, capable d'avoir une originalité en synthèse et qui maîtrisait les concepts de la physique. » [I Hérold, 2007, p. 7].

⁴¹ Il y aurait une étude systématique à mener sur l'influence du CECM sur la recherche à l'ENSCP et réciproquement l'importance des ingénieurs ENSCP en *Chaudronnerie*. Le lien entre Livage et Montel se tisse probablement à travers Chaudron, alors directeur du CECM et de l'ENSCP.

(rayons X) afin d'étudier le « polymorphisme » de KNO_3 et Na_2SO_4 entre -170°C et 1000°C . Une nouvelle fois, le titre de la thèse affiche une volonté de corrélérer les évolutions structurales aux propriétés, ici thermodynamiques. Lorsque Mazières défend son travail devant Laffitte (président), Guinier et Michel, Mondain-Monval vient de décéder. Pourtant le doctorant ne se trouve pas sans appui puisqu'au cours de son travail, il a bénéficié de l'aide de Hackspill qu'il remercie pour ses « conseils et encouragements » et « collaboré » avec Guinier et Michel [Mazières, 1961]. En 1965, profitant de la croissance d'Orsay – alors à ses débuts – et probablement de ses relations avec Michel – qui y dirige le Laboratoire de chimie minérale –, il est nommé « maître de conférences » de la faculté des sciences où il monte une équipe de recherche.⁴² Au cours de sa thèse, Livage est aussi chargé de l'organisation avec Olivier Kahn et Marc Condat, deux anciens camarades de Chimie Paris, des travaux dirigés de « chimie théorique » à l'École, dont le cours magistral est assuré par Fayard.⁴³ À la fin de sa thèse sur la « zircone obtenue par précipitation » (1970) et les « oxydes amorphes », Livage part en post-doctorat à Oxford, haut-lieu de la résonance paramagnétique électronique (RPE) depuis les années cinquante.⁴⁴ Il se familiarise là-bas avec la RPE, technique alors peu utilisée par les chimistes et quasiment inexistante en chimie du solide.⁴⁵ À son retour, il rejoint le Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide en train de s'implanter à l'ENSCP et convainc Collongues du bien fondé de la spectroscopie pour étudier les solides, en particulier la RPE (IV.3.2.2). Avec ce nouvel instrument, il reprend le thème général des oxydes amorphes sur la question particulière des « dorsales antistatiques » d'oxydes de vanadium sur un financement de Kodak France. Ceci le conduit à la réalisation de « gels » et vers l'étude spécifique des oxydes semi-conducteurs amorphes, dont V_2O_5 devient le représentant le plus étudié.⁴⁶

Cette sollicitation industrielle appelle une précision importante.⁴⁷ Livage et d'autres insistent sur l'aspect industriel des sols-gels. L'industrie nucléaire en particulier a pu utiliser et favoriser les procédés sol-gel en organisant des congrès internationaux comme à Vienne, en mai 1968, sur les *Sol-Gel Processes for Ceramic Nuclear Fuels* [IAE, 1968]. Le seul français présent à cette occasion, D. Damien, n'est pas universitaire mais membre du CEA (CEN Fontenay). De même, de nombreux industriels des matériaux comme Saint-Gobain, Rhône-

⁴² « Charles Mazières, en 1965, l'année où j'ai commencé ma thèse avec lui, a été nommé maître de conférence à l'université d'Orsay, équivalent à professeur deuxième classe. Donc moi j'étais à Paris, j'étais enseignant ici à l'ENSCP, et lui a monté un laboratoire à Orsay. » [I Vivien, 2004, p. 2].

⁴³ « Les trois auteurs sont enseignants à l'ENSCP où ils dirigent depuis plusieurs années des séances de travail en groupe consacrés à la chimie théorique. [...] Le manuscrit de cet ouvrage a été remis en novembre 1970. » Le cours est assuré par Michel Fayard, qui a la « tâche difficile d'initier les étudiants aux applications de la mécanique quantique à la chimie. » [Condat, Kahn & Livage, 1972, préface et avant-propos].

⁴⁴ « Brebis Bleaney, le plus brillant de leur lot [des physiciens britanniques], était à mon arrivée [1948] précisément en train de fonder la fameuse école de résonance paramagnétique d'Oxford qui sous son égide allait pendant plus de trente ans dominer le monde dans cette discipline. » [Abragam, 1987].

⁴⁵ Jacques Livage « avait fait un stage post-doctoral en Angleterre [... en] Résonance Paramagnétique Electronique, en abrégation RPE. Il avait convaincu Robert Collongues qui, comme je vous l'ai dit, était toujours favorable à laisser les gens s'exprimer quitte à les canaliser un petit peu, à acheter un appareil de RPE, ce qui était tout à fait innovant pour des chimistes à l'époque. C'était une technique réputée de physiciens et il y avait peu de laboratoires de chimie équipés de cette technique. » [I Vivien, 2004, p. 5].

⁴⁶ « Quand je suis arrivé chez Collongues, j'avais un contrat avec Kodak pour la réalisation de dorsales antistatiques qui étaient des oxydes de vanadium ayant des propriétés électriques. Il s'est avéré que pour pouvoir déposer cet oxyde, il était très commode de fabriquer des gels. C'est pourquoi je suis passé des hautes températures qui ordinairement servent à déposer des couches minces à la chimie douce. C'est donc une problématique industrielle qui a fait que je suis passé d'un thème haute-température à la chimie à température ambiante. » Par souci de simplification probablement, le témoin passe sous silence son travail antérieur et l'apport de son directeur de thèse – qu'il ne cite d'ailleurs pas – à la chimie à basse température. » [I Livage, 2001, p. 1]

⁴⁷ Je dois cette remarque à Jérôme Douce, qui, après une thèse CIFRE avec Essilor dans le groupe Boilot, a été embauché comme ingénieur R&D par la société Saint-Gobain.

Poulenc ou Essilor ont pu financer des recherches en sol-gel. Cependant, la production industrielle de ces sociétés est, encore aujourd'hui, majoritairement assurée par les techniques traditionnelles. L'utilisation de solvants organiques – les alcools en particulier – est souvent rédhibitoire pour une production en usine.

Ainsi, si l'on suit pas à pas le parcours de Livage il devient évident, comme il le dit lui-même, qu'il s'est construit indépendamment de Collongues durant ses dix premières années de recherche.⁴⁸ Ce qu'il ne mentionne pas, ce sont ses travaux antérieurs menés sous la direction de deux chimistes liés aux synthèses ou transformations à basse température : Montel puis Mazières. Ce silence tend à exagérer la rupture induite en 1972-1973 lorsqu'il rejoint le groupe Collongues et se lance sur les oxydes de vanadium amorphes alors qu'il reprend partiellement ses travaux de thèse.⁴⁹

La trajectoire de Livage et Rouxel, qui sont parfois perçus comme les deux « fondateurs » de la chimie douce en France, montre combien chacun à sa façon s'appuie sur des traditions antérieures. La synthèse à basse température existait avant, durant les années cinquante et soixante à Lyon, Toulouse, Orsay, Mulhouse, Nancy... Ce qui change surtout, c'est que ceux qui la pratiquent prennent une plus grande importance sociale. Livage est nommé professeur à l'université Paris VI en 1974 puis quitte le LCAES avec une équipe, des appareils et une dotation financière⁵⁰ pour fonder le Laboratoire de spectrochimie du solide (1977). Celui-ci reste lié au LCAES au sein du Laboratoire associé n°302 (LA 302). Grâce au soutien extrêmement généreux de Collongues, séduit par le charme et les capacités du personnage – il aurait favorisé Livage au détriment de son propre laboratoire –, la nouvelle équipe décolle rapidement.⁵¹ Dès 1984, Livage prend la direction du LA 302 avec la bénédiction de Collongues tandis que son Laboratoire compte déjà 10 chercheurs (5 thésards et 3 enseignants chercheurs) et 4 personnels ITA, soit 32% du total du LA (qui contient quatre équipes). Deux ans plus tard, le Laboratoire compte 14 chercheurs sur les 33 du LA (soit 42%). Pendant les années 1980-1986, cinq des neuf appareils achetés – et non des moindres – le sont pour l'équipe de Jussieu : une enceinte d'évaporation sous vide, trois spectromètres (RPE-ENDOR, IR, RMN), un équipement de photo-électrochimie, un appareil de mesures électriques (impédance), du matériel informatique [RA LA 302, 1980 ; 1984 ; 1986]. En une dizaine d'années seulement (1977-1986), la nouvelle équipe s'impose comme l'équivalent en termes d'effectifs du LCAES. Certes, tout ne dépend pas de Collongues.

Durant ces années, le Laboratoire Livage (dirigé par la suite par Clément Sanchez) se spécialise sur le « sol-gel » puis développe de nouveaux concepts de « chimie douce », ce qui lui assure une gloire internationale encore aujourd'hui.⁵² Livage et ses collaborateurs savent

⁴⁸ « D'abord mon origine n'est pas le laboratoire Collongues. Je l'ai rejoint dix ans après le début de ma thèse et à la suite d'un postdoc à Oxford. Après une formation de chimiste à l'Ecole de Chimie de Paris, j'ai préparé une thèse sur la zircone obtenue par précipitation. Ensuite je suis allé à Oxford pour étudier la résonance paramagnétique électronique - ce qui est un thème de physique. C'est en revenant que j'ai rejoint le laboratoire de Collongues. » [I Livage, 2001, p. 1].

⁴⁹ Quand Livage « a développé son laboratoire à Jussieu après avoir été nommé, il a repris des travaux qu'il avait faits, en les développant avec de nouveaux concepts, sur la base de ses travaux de thèse » [I Vivien, 2004, p. 8].

⁵⁰ « assez vite, il [Livage] a pris son essor : il a eu un poste de professeur à Jussieu et il a créé son laboratoire là-bas, avec la bénédiction et même l'aide de R. Collongues. Ce dernier a fait en sorte qu'il ait des chercheurs, des enseignants, du matériel. [...] Ils ont eu une dotation, je pense qu'elle devait être bien. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 8-9].

⁵¹ « Je ne sais pas comment il s'y prenait, mais il y a eu toute une période où Jacques Livage avait plein de postes au dépens de l'équipe Collongues quand il était directeur de l'UMR (Unité Mixte de Recherche). Finalement, Collongues a énormément aidé Livage » [I Serreau, 2004, p. 11].

⁵² « C'est Livage qui a développé le sol-gel en France » [I Rousset, 2006, p. 6]. « Le sol-gel est un des axes particuliers de la chimie douce dont l'acteur le plus marquant est, en France, Livage avec Sanchez » [I Tournoux, 2006, p. 15]. « Le laboratoire de Livage, devenu celui de Sanchez, en est une superbe démonstration, ils ont

développer une chimie de qualité, reconnue parmi les pairs. Si le « sol » peut être défini comme un système assurant la stabilité – à la limite de l'équilibre – d'espèces chimiques possédant une certaine taille, le « gel » s'obtient par déstabilisation du « sol » en modifiant légèrement les paramètres physico-chimiques.⁵³ Les interactions mises en jeu sont des liaisons faibles (type hydrogène, Van der Waals) ou électroniques (liaison chimique). Le sujet, espace nouveau à défricher, et l'aide sociale et technique de Collongues ne suffisent pas à expliquer un tel succès. Il faut aussi développer un réseau d'alliés multi-élémentaire (organique, minéral, hybride), multidisciplinaire (verriers, céramistes et chimistes) et international (européen d'abord).⁵⁴ En tant que processus collectif, le sol-gel est la conjonction de ces multiples facteurs.

Livage est brillant, intelligent et sait manœuvrer en société.⁵⁵ Pour le recrutement des étudiants, il opte pour une grande diversité : enseignant en DEA matériaux à Paris VI, il professe aussi à l'ENS ou à l'École polytechnique. À la manière de Hagemmuller, il joue la carte des anciennes « colonies » françaises et recrute des thésards en provenance d'Afrique du Nord, qui, souvent, sont financés par l'État d'origine. Il n'hésite pas non plus à collaborer avec le milieu industriel en réponse à ses demandes ou en sollicitant des fonds. Les industriels sont intéressés par les gels, domaine en pleine expansion pour les applications.⁵⁶ Les crédits privés servent essentiellement aux financements de thèses et de post-doctorats. Ainsi en 1985-1986, Schlumberger et la CGE financent des thèses respectivement sur les « affichages électrochromes des gels d'oxyde » et les « matériaux cathodiques à base de V_2O_5 amorphe. » Cette intime association permet d'assurer un avenir professionnel aux doctorants à une époque où la recherche publique recrute peu. La politique des brevets est aussi laissée à la discrétion des industriels pour ne pas risquer de perdre des financements.⁵⁷ Ainsi, le niveau de

formidablement exploité cette mine-là, ils sont extrêmement respectés au plan international. [...] Sanchez, un ancien de Chimie Paris, est un type intelligent qui ne s'est pas contenté de faire des publications, d'en rajouter, il a créé des nouveaux concepts avec Livage. Ils sont au tout premier rang mondial – je les connais par l'amont parce que comme la chimie du verre et les sols gels sont un peu de la même famille, j'entends parler de ce qu'ils font par mes collègues à l'extérieur. » [I Lucas, 2005, p. 8].

⁵³ « *We can accept that in all cases the sol is a system which allows chemical species to become stable in solution but on a level where the species have either acquired a particle size or molecular weight whereby the sol is only just stable and if the conditions of solvation or suspension are changed slightly this can lead to destabilization of the sol as:*

- *precipitation of the sol species as aggregated particles*
- *precipitation of unaggregated particles*

formation of a homogenous gel » [Jones, 1989, p. 3].

⁵⁴ « En France, on a créé un groupe sol-gel au CNRS qui regroupait une quinzaine de laboratoires français. C'était dans les années 80-90. C'était vraiment le démarrage : on rassemblait des laboratoires de chimie organique et de chimie minérale. Il y a eu des séminaires, des écoles d'été. Ensuite, avec des collègues allemands, on a fait un groupe européen et ensuite ça s'est diversifié. Le domaine s'est constitué d'abord avec les verriers (les laboratoires de recherche sur le verre qui étudiaient les gels de silice). Ensuite se sont joints les céramistes dans le domaine de *Materials Science* qui ont beaucoup exploité cela pour fabriquer des céramiques. Et maintenant la voie la plus prometteuse ce sont les hybrides. » [I Livage, 2001, p. 2].

⁵⁵ Livage « a su s'y prendre dans tous les domaines : être un bon enseignant, alors lui aussi je pense que c'est un très bon enseignant, très charismatique, mais aussi sachant se débrouiller dans la communication, moderne en même temps, c'est quelqu'un d'intéressant. Assez carriériste tout de même malgré le côté "tout le monde il est beau, tout le monde il est gentil" » [I Serreau, 2004, p. 11]. « Livage est plutôt du style Hagemmuller, à défendre son pied carré. » [I Colomban, 2003].

⁵⁶ « il y a des applications réelles, commerciales : typiquement des films minces sur du verre. Il y a pas mal d'industries qui ont lancé des départements sols-gels, par exemple le CEA. [...] Les enjeux des gels sont très importants pour l'industrie. [...] le Sol-gel, c'est très industriel. Notre chance c'est d'intéresser l'industrie tout en faisant des recherches pas trop appliquées. » [I Livage, 2001, p. 2, 4].

⁵⁷ « je ne connais pas les besoins économiques. On a déposé une quinzaine de brevets sur 5 années. Mais toujours pris par les industriels. La seule fois où j'ai pris un brevet d'État par l'ANVAR cela a bloqué une collaboration avec Saint-Gobain. » [I Livage, 2001, p. 3]

financement (hors salaire) du laboratoire est assuré aux deux-tiers par l'industrie en (2001) et de plus en plus par l'Union européenne.⁵⁸ Autant de bonnes recettes pour que le Laboratoire soit connu et reconnu à l'étranger et ses cadres invités aux conférences internationales.⁵⁹

De la même façon, Rouxel, excellent chimiste, est aussi un redoutable duelliste social. Durant toute sa carrière, Rouxel s'appuiera sur la puissance de son patron de thèse⁶⁰, Hagenmuller, en sachant protéger les intérêts de Nantes contre l'hégémonie bordelaise, en s'appuyant à l'occasion sur Collongues. N'écouter pas Hagenmuller, il développera à Nantes la microscopie électronique.⁶¹ N'a-t-il pas d'ailleurs été surnommé « le cardinal » au sein de la communauté, pour son habileté à manœuvrer en société, à utiliser les dissensions internes ? Le laboratoire nantais, après la fusion avec l'équipe de Michel Tournoux en 1974, est associé au CNRS. Il continue à se développer à un bon rythme jusqu'à devenir l'Institut des matériaux de Nantes (VI.3.1.3).

Quelles informations plus générales peut-on en tirer de ces deux cas particuliers ? Une continuité historique à nouveau. Les « composés d'insertion » ou le « sol-gel » ne s'accrochent pas subitement à l'arbre des sciences. Des acteurs sociaux du champ scientifique (Livage, Sanchez, Rouxel, Tournoux) ont lié ce champ émergent à leur propre carrière. Ils ont pu être aidés en cela par les barons de la chimie du solide (Collongues, Hagenmuller) et par l'utilisation d'une nouvelle instrumentation, différente de la diffraction des rayons X (RPE) (VI.2.1) ou par le recours à des domaines plus marginaux jusque-là (graphite, sulfures). Paradoxalement, une volonté de convaincre de la rupture. La génération qui porte la « chimie douce » à partir des années soixante-dix tente d'effacer l'influence des traditions antérieures. Par exemple, elle ne mentionne pas la génération d'après-guerre dans ses titres et travaux scientifiques. La nouvelle génération a tendance à "oublier" qu'elle s'inscrit dans un tissu historique préexistant, qui est de moins en moins visible à mesure que le temps passe : Mondain-Monval, Mazières, Pâris, Rousset, Chaudron, Montel ont, à divers degrés, défendu et approfondi la synthèse à basse température à partir de « précurseurs » organiques. Hérold, Rüdorff ou Pacault ont travaillé à l'insertion du graphite bien avant Rouxel. Même en France, ils ne sont pas les seuls.⁶² Sol-gel, co-précipitation, méthode des précurseurs, insertion à température ambiante ou intermédiaire sont désormais rassemblés au sein d'un ensemble cohérent – la chimie douce – mais ils préexistent, fragmentées en chimie minérale et chimie

⁵⁸ « 1/3 vient de l'Etat et 2/3 de l'industrie mais ce ratio n'inclut pas les salaires de chercheurs qui viennent de l'Etat. On a aussi beaucoup de contrats européens. La gestion est assurée au niveau central par Jussieu. » [I Livage, 2001, p. 4].

⁵⁹ Ce sont essentiellement Livage et son successeur à la tête du Laboratoire, Clément Sanchez, qui sont invités aux conférences internationales, surtout aux Etats-Unis. Si l'on compare avec le LCAES pour les années (1988-1990) : 31 conférences internationales invitées pour l'ensemble de l'équipe Livage contre 11 pour l'équipe Vivien, qui est pourtant considérée comme une excellente équipe de recherche [RA LA 302, 1990, p. X, 63].

⁶⁰ « mon ami Jean Rouxel était le plus "hagenmullerien" des élèves d'Hagenmuller. » [I Tournoux, 2006, p. 8]. « la filiation Hagenmuller – Rouxel a été très forte. Pour vous donner une idée, Brec m'a raconté une histoire : pour sa première publication à Nantes pour les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (CRAS)*, Rouxel, après l'avoir rédigée, l'avait envoyée à Bordeaux pour obtenir l'avis d'Hagenmuller. Il fallait aussi faire la détermination de structure d'un composé monoclinique et Rouxel avait envoyé son élève à Bordeaux en lui disant : "Brec, vous me ramenez l'angle". » [I Ouvrard, 2006, p. 4].

⁶¹ « Collongues nous a toujours soutenus, il faisait partie de ces gens ouverts, c'est-à-dire qui savent reconnaître le mérite des groupes émergents et les laissent se développer. » [I Tournoux, 2006, p. 12]. « La position de Nantes était un peu ambiguë parce que Rouxel, tout en laissant se développer l'attaque contre la cristallographie, continuait, avec raison, à faire de la cristallographie dans son propre laboratoire » [I Galy, 2006, p. 29]. « La chimie du solide française a été dominée par un certain nombre d'équipes qui s'entendaient pour truster les places et les moyens, autour de Hagenmuller, de Nantes et autour de Collongues. » [I Caro, 2005, p. 9].

⁶² « L'approche en solution [...] : on prépare le solide à partir d'une solution où on fait précipiter [les réactifs en solubles] ou par des réactions d'hydrolyse, condensation, polymérisation, on prépare des espèces de masses moléculaires de plus en plus grandes, par ces techniques en solution. » [I Vivien, 2004, p. 8].

physique. On peut avancer l'hypothèse, qu'à l'instar de la chimie du solide avec un décalage de vingt ans, la « chimie douce » subsume des pratiques éparses pour former une communauté consciente d'elle-même (1970-1990). À ceci près, qu'aucun témoignage ne considère la chimie douce comme une discipline autonome ni ne la sépare de la chimie du solide. La chimie du solide contient la chimie douce, qui ne constitue qu'un axe de recherche.⁶³ Dans le cadre de l'Université de tous les savoirs, Livage prononce une conférence intitulée *Verres et céramiques, de l'art du feu à la chimie douce*. Produite sous la forme d'un documentaire audiovisuel, le message est clair : placer la chimie douce dans la continuité de la chimie du solide [Livage, 2000].

Suivre deux trajectoires individuelles a mis en évidence des interactions diachroniques fortes – à travers le nœud que constitue la thèse pour Livage, ou les premières années de chercheur pour Rouxel –, qui relativisent énormément l'éventuelle image de « fondateurs ». Le sol-gel et l'insertion participent d'un ensemble beaucoup plus vaste des méthodes de synthèse de solides à basse température qu'on a voulu appeler « chimie douce » en France.

VI.1.2.2. Quelques repères spatio-temporels en France.

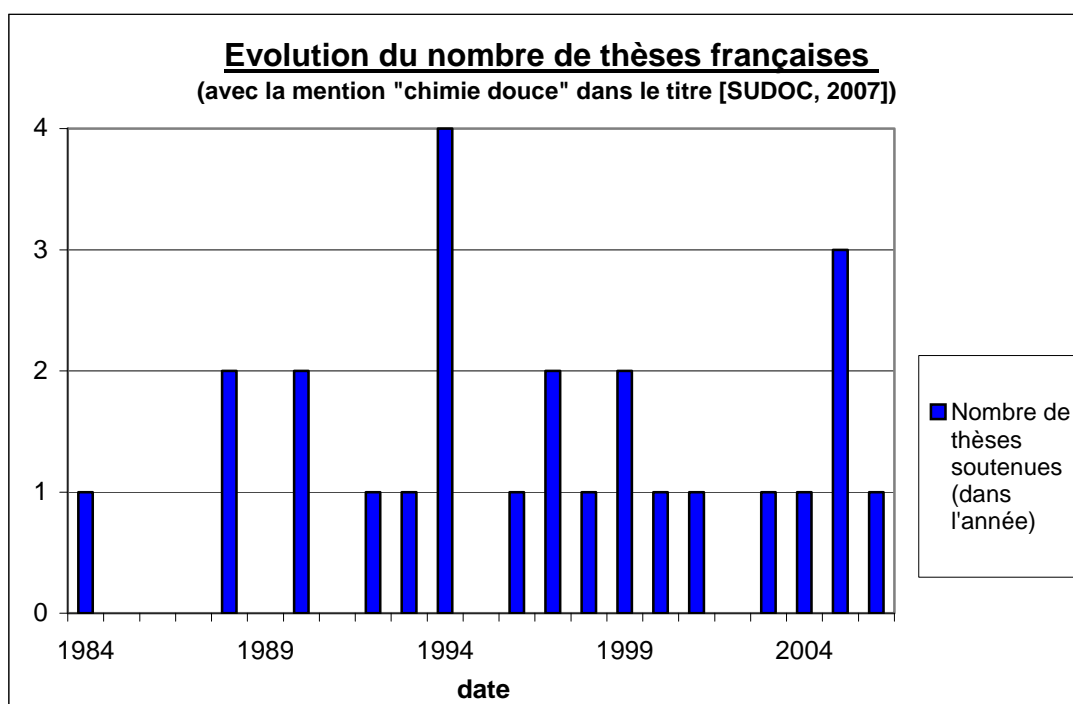
Je cherche, ici, à mettre en perspective quelques dates clés pour la chimie douce, en France, et à tracer l'image du territoire national. Les dates insisteront singulièrement sur certains noms propres ou repères institutionnels visibles au détriment de la dynamique collective. L'expression « chimie douce » a été forgée en français avant d'être couramment reprise en anglais – ce qui est suffisamment rare dans les sciences contemporaines pour être mentionné – de préférence à « *soft chemistry* » ou « *soft chemistry of solids* ». C'est néanmoins en français qu'elle a le plus de sens.⁶⁴ À qui doit-on l'expression ? Livage en revendique la paternité dans un article du *Monde* du 26 octobre 1977 lorsqu'il était chargé par le quotidien d'écrire chaque mois un article de vulgarisation scientifique. L'expression aurait ensuite été reprise puis utilisée par d'autres. Il est intéressant d'aller voir l'article en question. L'expression « chimie "douce" » n'apparaît qu'une seule fois, dans le résumé introductif, posée comme par inadvertance en passant : là n'est pas l'idée force du texte. Intitulé « Vers une chimie écologique. Quand l'air et l'eau remplacent le pétrole » [Livage, 1977], l'article milite avant tout pour une autre chimie – à inventer – qui suivrait la « marche naturelle », en s'inspirant de la nature : une « chimie écologique », comme le résume bien le titre. Vingt-cinq plus tard, Livage définit cette chimie comme « biomimétique » [Livage, 2004, p. 3] Le fil rouge du texte explique comment l'homme pourrait s'affranchir du « pétrole » à partir de matières premières « abondantes et bon marché », directement accessibles dans l'eau et l'air (H₂O, CO et CO₂). Si, effectivement, l'origine de l'expression – peut-on jamais affirmer qui est l'auteur d'une expression aussi simple ? – est à chercher ici, il est piquant de voir que l'histoire n'a pas vraiment retenu ce que la vision utopiste de l'auteur appelait de ses vœux. Le « il n'est pas utopique de penser qu'au vingt et unième siècle, l'air et l'eau remplaceront le pétrole » est

⁶³ « PT : Si on voulait définir la chimie douce d'un côté, la chimie du solide de l'autre, que diriez-vous ? – AR : Non, la chimie douce n'est qu'un aspect de la chimie du solide. Dans la chimie du solide, il y a plusieurs types de chimie dont la chimie douce, qui est une branche ou une activité de la chimie du solide, il ne faut pas dissocier les deux. » [I Rousset, 2006, p. 7]. « Pour moi, chimies du solide et douce ne sont pas dissociées. La chimie douce constitue une partie des voies de synthèse de la chimie du solide, celle qui donne des précurseurs, elle peut être une étape de la synthèse mais pas le tout. » [I Ouvrard, 2006, p. 9].

⁶⁴ Si en 1997 Rouxel n'hésite pas à s'autoproclamer l'un des « pères de la "chimie douce" en France » dans un amphithéâtre du Collège de France [Rouxel, 1997, p. 1], lorsqu'il rédige un *curriculum vitae* en anglais pour la *Wolf Foundation* (Israël) en 1994, il ne précise que d'« outstanding contributions to the development of Solid State Chemistry » [Archives Gif-sur-Yvette, 990049, SC carton n°1].

assez éloigné de ce début de vingt et unième siècle justement. Au delà du clin d'œil de l'histoire à l'auteur, il y a une piste extrêmement féconde qui se dégage du texte : le lien fort entre cette « chimie écologique » et « bon marché », à inventer, et la « crise » occidentale, de ses valeurs et de son économie. Le pétrole pollue et en plus il est devenu trop cher ! La « chimie douce » serait-elle la fille illégitime de Mai 68, écologiste et tiers-mondiste, et de la crise économique, énergétique et nationaliste ?⁶⁵ L'idée est intéressante mais le recours quotidien aux solvants organiques démythifie les images écologique (VI.3.1.1) et accessible à tous de la chimie douce.

Une simple recherche par mots-clés sur le serveur SUDOC permet de suivre la présence de l'expression « chimie douce » dans le titre des thèses défendues en France. Leur liste est donnée en annexe A.VI.1.



Une telle recherche n'a pas pour but de mettre en évidence l'émergence du domaine mais plutôt de chercher le moment où le mot-clé est le plus employé. La première thèse mentionnant l'expression dans son titre date de 1984 (Le Mans, dirigé par de Pape). Cette date correspond aussi au moment où les Nantais ont vraiment l'impression de se mettre à la chimie douce.⁶⁶ Si on suit le nombre de thèses, l'apogée de la mode « chimie douce » se situe autour de 1994, qui constitue un pic annuel certes (4 thèses), mais qui représente aussi la date autour

⁶⁵ Dans le même numéro du 26 octobre 1977, on trouve deux articles à la « rubrique ENERGIE » du Monde intitulés « La France a-t-elle les moyens de sa politique pétrolière ? » et « L'inégalité énergétique. La France est le pays le plus mal placé. » Il semble qu'une nouvelle fois la facture énergétique soit plus convaincante que les utopies alternatives en démocratie capitaliste. C'est le point de vue de Rouxel : « C'est un problème de société qui est sans doute largement à l'origine du renouveau de la synthèse en chimie des solides. La crise de l'énergie, en 1974, amenait à se pencher sur la nécessité de réduire le coût énergétique des matériaux. Ainsi la chimie des matériaux dont le nom, en français, a désormais fait le tour du monde. » [Rouxel, 1998, p. 6]

⁶⁶ « J'ai eu un grand virage en 1984, on a cherché d'autres façons de synthétiser les solides par la chimie douce pour fabriquer Li_2BS_3 . On procédait en solution, dans l'eau, à température ambiante. » [I Ouvrard, 2006, p. 3]. « On en a fait plus tôt [que 1993] certainement sans savoir que c'était de la chimie douce » [I Tournoux, 2006, p. 14].

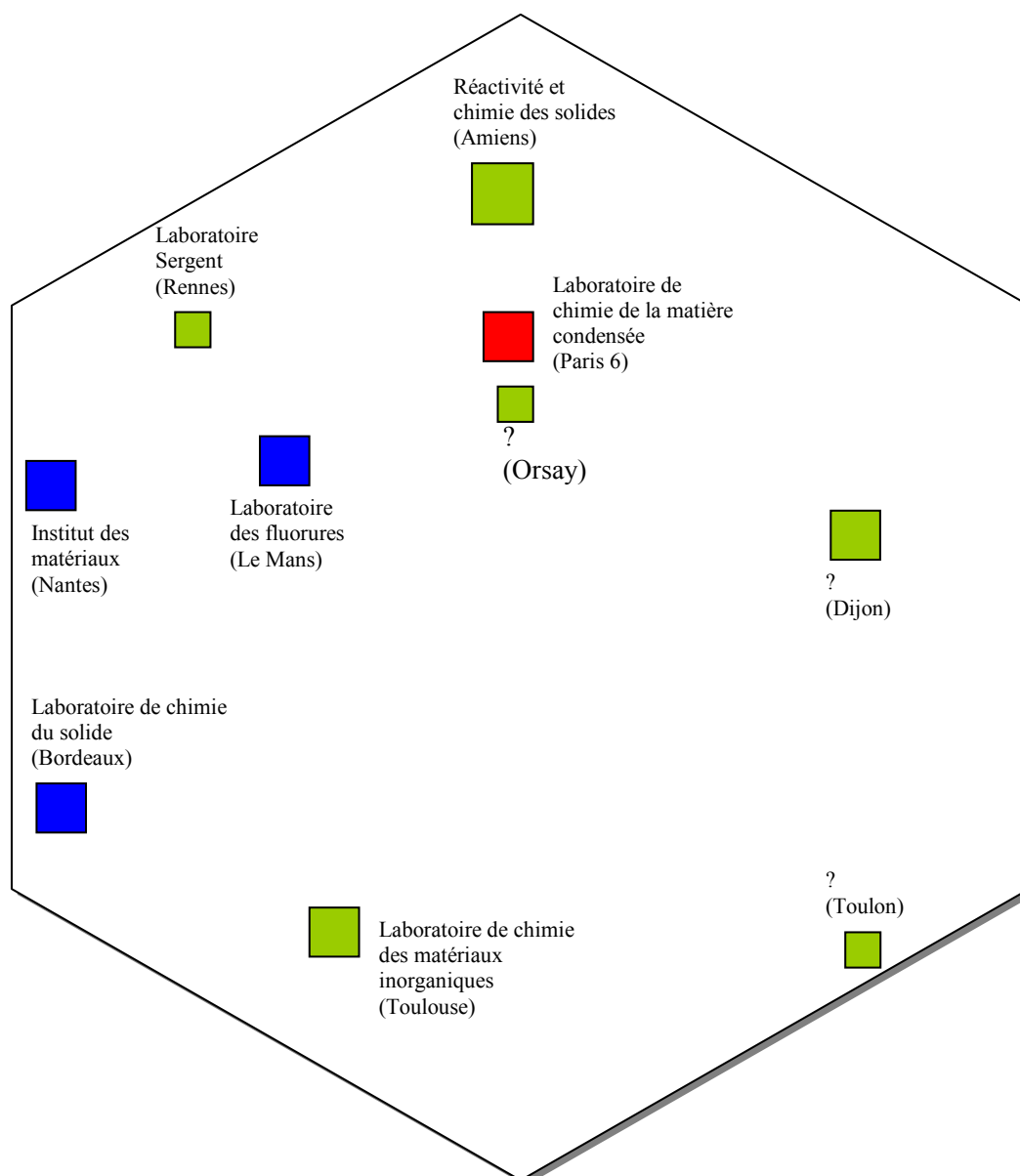
de laquelle la densité est la plus grande : que ce soit sur le quinquennat 1990-94 ou 1994-98, on trouve huit thèses (ce qui représente un maximum pour l'ensemble de la période 1984-2006). En septembre 1993, l'année précédant le pic de thèses, Rouxel, Tournoux et Brec co-organisent le premier congrès international portant sur la « chimie douce », en France, à Nantes. Ils en publient les actes sous le titre « *Soft Chemistry Route to New Materials* » [Rouxel & al. 1994]. Selon Tournoux, l'un des co-organisateurs, le congrès marque une consécration de la chimie douce, tout au moins, une étape majeure.⁶⁷ Doit-on y voir la même volonté de fondation qu'a pu revendiquer Hagenmuller avec son congrès de Bordeaux de 1964 pour la chimie du solide ? Question ouverte. Néanmoins, Tournoux et Rouxel sont d'accord pour fixer l'essor de la chimie (douce) des précurseurs durant la première moitié des années 1970.⁶⁸ Les différentes branches de la chimie douce ne se développent pas forcément au même moment. Ainsi, des congrès internationaux ont pu porter sur des aspects spécifiques de la chimie douce comme le sol-gel. Au début des années 1980 s'est tenu le premier congrès international « sol-gel », en 1981 en Italie. Par la suite, la communauté sol-gel s'est régulièrement réunie tous les deux ans, rassemblant entre trois et quatre cents chercheurs dans le monde.⁶⁹

L'analyse des thèses sur SUDOC apporte deux autres informations. Premièrement, elle donne une idée de la répartition géographique des laboratoires liés à la chimie douce (elle en oublie probablement aussi).

⁶⁷ « PT : Pour parler un peu de chimie douce ? – MT : L'une des grandes étapes a été ce congrès qu'on a organisé à Nantes en 1993. On a invité à l'époque tous les gens qui s'intéressaient et qui marquaient la chimie douce contemporaine. C'est le premier congrès international de chimie douce. Les *proceedings* de "*Soft Chemistry Routes to New Materials*", édités par Rouxel, Tournoux et R.Brec – sont publiés par Trans. Tech. Publications. [...] Disons que la consécration de cette émergence a été 1993. On en a fait plus tôt certainement sans savoir que c'était de la chimie douce. » [I Tournoux, 2006, p. 15].

⁶⁸ « *The field known as chimie douce (soft chemistry) using solid precursors is now more than two decades old.* » [Rouxel & Tournoux, 1996, p. 141].

⁶⁹ « Tous les deux ans, nous avons un congrès de la communauté sol-gel. Le premier a eu lieu en 1981 en Italie. 300 ou 400 personnes se réunissent. Si l'on compte que chaque laboratoire envoie environ deux personnes on peut évaluer la communauté à 3 ou 4000 chercheurs. » [I Livage, 2001, p. 4].



Les dix laboratoires, qui produisent les dix-huit thèses entre 1984 et 2000, se répartissent sur l'ensemble du territoire national. Les trois laboratoires indiqués en bleu représentent l'« école bordelaise » (IV.4) : Bordeaux, Nantes, Le Mans tandis que la couleur rouge désigne le laboratoire Livage et sa filiation avec la *Chaudronnerie*. Il n'est pas possible de classer les six laboratoires suivant une filiation relevant des quatre familles des années cinquante (II.1), ce qui suggère la fin des empires scientifiques à partir des années quatre-vingt. Les trois laboratoires marqués d'un point d'interrogation n'ont jamais été mentionnés par les témoignages, ce qui les place à la périphérie de la chimie du solide.

L'analyse des thèses montre aussi à quel point la thématique « chimie douce » renvoie à des domaines très variés. Les dix-huit thèses soutenues entre 1984 et 2000 renvoient à pas moins de neuf disciplines différentes avec par ordre d'importance quantitative : chimie (5), science des matériaux (3,5), physique (3), sciences appliquées (2), chimie-physique (1), physique-chimie (1), sciences (1), sciences et techniques (1), chimie du solide (0,5). L'une des thèses a un titre intéressant, « Nouveaux thiophosphates de métaux de transition obtenus par chimie douce et chimie dure » [Fragnaud, 1992], dans la mesure où l'auteur propose un néologisme « chimie dure » par opposition à « chimie douce ». Ce faisant, il renvoie face à

face la chimie du solide « conventionnelle » à haute température et la chimie à basse température. Même si le néologisme ne prend pas – personne ne voulant vraiment opposer chimie douce et chimie du solide –, je le trouve intéressant.

De hautes distinctions nationales, décernées à quelques individus associés à la chimie douce, sans stabiliser l'ancrage institutionnel du domaine. Le plus récompensé est Rouxel, qui dans aucun de ses écrits n'insiste lourdement sur son appartenance à la chimie douce. Correspondant de l'Académie des sciences à 50 ans (1985), il en devient membre trois ans plus tard, sans qu'aucune de ses notices ne mentionne l'expression « chimie douce », lui préférant chimie du solide et basse dimensionalité [Rouxel, 1985, 1988]. En 1996, il obtient un poste au Collège de France, qui, selon l'usage, affecte une chaire à un individu, le laissant libre d'en choisir l'intitulé.⁷⁰ Rouxel choisit « chimie des solides » (et non pas chimie douce). Ce n'est qu'à l'oral, devant la communauté réunie, qu'il se déclare enfin comme l'un des pères de la « chimie douce ». L'utilisation seulement orale de l'expression définit plus un signe de reconnaissance communautaire qu'un domaine institutionnalisé. Enfin, en 1997 suivante, Rouxel reçoit la plus haute distinction nationale en recherche scientifique : la médaille d'Or du CNRS, pour ses travaux sur les conducteurs de basse dimensionalité, devenant ainsi le cinquième chimiste français couronné – notamment après Pascal (1967) et Chaudron (1969). Son décès prématuré, en 1998, drapait le personnage dans un prestige supplémentaire.

La chimie douce pose un nouveau cas de « modernité ». Certes, la situation a changé entre les années cinquante et soixante et les années quatre-vingt. Mais que s'est-il passé au cours des années soixante-dix ? Pourquoi les acteurs refusent-ils de l'envisager comme une discipline scientifique autonome, indépendante de la chimie du solide ? Y a-t-il quelque chose de radicalement neuf en chimie du solide ou est-ce de l'ancien restauré par un discours rhétorique ? Comment chacun des acteurs individuels se situent-ils dans la problématique identitaire ?

VI.1.2.3. Débat des Anciens et des Modernes sur la chimie douce

À la question "qu'est-ce que la chimie douce ?", trois grands types de réponses m'ont été proposés. Certains chimistes auront tendance à répondre que c'est de l'ancien redoré avec un arsenal de mots modernes pour le déplorer ou s'en féliciter.⁷¹ D'autres reconnaîtront une percée scientifique (synthèse, concepts et instruments) en rupture avec le passé, qui a favorisé un nouvel essor de la chimie du solide française.⁷² Une troisième catégorie, peut-être plus

⁷⁰ Écoutons l'un des membres de cette ancienne institution créée sous François I^{er} qui se veut toujours moderne. « Le gage de cette modernité, toujours vivante selon moi, est la mobilité des chaires. Ce qui est permanent dans le Collège de notre temps, c'est le nombre de *crédits de chaire* (avec une très lente dérive dans le sens de l'augmentation), qui correspond au nombre de professeurs titulaires. Ce qui devient disponible par départ à la retraite ou décès d'un titulaire n'est pas *sa* chaire mais *une* chaire. Conserver une discipline ne va jamais de soi et doit être argumenté et motivé au même titre qu'un changement. En cas de changement, il n'y a parfois aucune corrélation entre le partant et l'arrivant » [Abragam, 1987, p. 220].

⁷¹ « Pour Livage, c'est un peu différent. Nous faisons de la "chimie douce" avant. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 13]. « c'est bien d'avoir sorti un mot un peu nouveau pour dire qu'on faisait de la chimie douce mais même les chimistes du solide comme moi avaient déjà fait de la décomposition thermique d'oxalates, et d'autres le faisaient avant moi. » [I Galy, 2006, p. 24]. « À la fin des années 1960, le Laboratoire Pâris était, je pense, le premier laboratoire français qui travaillait systématiquement dans le domaine de la chimie douce. » [I Rousset, 2006, p. 2].

⁷² « C'était au moment du choc pétrolier, des problèmes d'énergie. L'idée était la suivante : ce que l'homme avec l'industrie fabrique à des hautes températures, la matière vivante le fabrique à température ambiante. Il y avait

restreinte, récuse la pertinence d'une telle expression et ne comprend pas très bien ni le pourquoi de son invention, ni son utilisation postérieure.⁷³

Premièrement, malgré les divergences de points de vue, aucun ne conçoit la chimie douce comme extérieure à la chimie du solide. Même si la chimie douce fabrique « graduellement » des composés originaux à basse température, parfois à partir de molécules, elle ne constitue qu'une branche, un domaine au sein de la chimie du solide.⁷⁴

Il est ensuite frappant de noter à quel point, pour chaque individu interrogé, les postures de témoin et d'acteur sont indissociables l'une de l'autre. Chaque analyse de la transition ancien-moderne est influencée par la trajectoire professionnelle du témoin. Kahn-Harari et Galy ont vécu durant les années soixante dans des laboratoires de chimie du solide, qui à la marge pratiquaient des synthèses à basse température (co-précipitation) : ils auront tendance à souligner la continuité du domaine en parallèle avec leur propre carrière. Pour Rousset, le cas est encore plus typique : il a l'impression d'avoir personnellement suivi une même ligne directrice, de sa thèse (1969) jusqu'aux années 1990, alors que le vocabulaire a changé.⁷⁵ Il s'en réjouit ouvertement pour affirmer une primauté du travail des « Lyonnais » qui, à l'époque, était dénigré par les mandarins du cristal alors qu'il est désormais à la mode. Pour la deuxième catégorie – celle de la rupture –, Livage est considéré comme un fondateur du domaine et aurait lui-même forgé l'expression éponyme. Le cas de Vivien est plus ambiguë : étant dans le même type de laboratoire que Kahn ou Galy, il devrait avoir tendance à proposer le même type de commentaire qu'eux. Deux détails pourtant le démarquent des autres : d'abord il se sent proche de Livage parce qu'ils ont fait une thèse similaire, dans le même laboratoire, et à cause d'affinités personnelles ; ensuite il ne joue pas, au sein du laboratoire, le même rôle que les deux autres. D'identité différente – il n'est pas « cristalochimiste » mais plutôt physico-chimiste –, il s'intéresse plus aux caractérisations spectroscopiques, ce qui l'éloigne plus que les autres de la réalité de la paillasse.⁷⁶ Lucas, quant à lui, considère sa trajectoire comme extérieure à la communauté française, ce qui lui permet de ne pas se situer sur le même plan que les autres et, ainsi, ayant lui-même bien

donc peut-être quelque chose à apprendre de ce côté là. » [I Livage, 2001, p. 3]. « *PT* : *Qu'est-ce qui distingue la méthode Collongues de celle de Livage ?* – *DV* : Ce sont deux approches complètement différentes du solide. L'approche en solution [...] et les] hautes températures [...] c'était deux aspects qui ne s'excluent pas bien entendu, mais deux écoles un peu différentes. » [I Vivien, 2004, p. 8]. Des gens comme Livage, Rouxel « pouvaient faire entrer dans la chimie du solide de nouveaux concepts, faire ce qu'ils ont appelé la « chimie douce. » Il ne faut pas trop tirer là-dessus non plus parce que, si on regarde l'histoire de la « *soft chemistry* », on voit qu'elle était faite par pas mal de gens qui ne savaient pas trop ce qu'ils faisaient. Cette ouverture a relancé la chimie du solide en lui montrant qu'il n'y avait pas que les monocristaux, les verres mais qu'on pouvait aussi faire des gels, des sols-gels... [...] Sanchez, un ancien de Chimie Paris, est un type intelligent qui ne s'est pas contenté de faire des publications, d'en rajouter, il a créé des nouveaux concepts avec Livage. » [I Lucas, 2005, p. 8].

⁷³ « On peut dire que l'intercalation a été une des sources de la chimie douce même si je n'aime pas trop ce terme, « chimie douce ». – *PT* : *Pourquoi ?* – *AH* : Sans doute parce que les dernières synthèses que j'ai effectuées ont exigé des températures supérieures à 500°C. » [I Hérold, 2007, p. 7]. « *PT* : Peut-on dire que la sono-chimie s'apparente à la chimie douce ? – *PC* : Je n'ai jamais bien compris ce que c'était que la chimie douce. Je dirais que la sono-chimie n'utilise pas des conditions douces mais au contraire des conditions violentes caractéristiques du non équilibre. » [I Caro, 2005, p. 16].

⁷⁴ « cette nouvelle partie de la chimie du solide appelée chimie douce qui vise à synthétiser des composés originaux, souvent métastables, non plus en une seule fois par des traitements de haute température, mais graduellement, comme en chimie moléculaire à partir de blocs atomiques préfabriqués. » [IUF, 1994, p. 29] Ce texte a probablement été écrit soit par Pouchard, soit par Rouxel.

⁷⁵ « J'ai toujours travaillé dans le domaine des oxydes, surtout des oxydes mixtes, qui sont devenus par la suite oxydes à valence mixte. Les mots-clés sont oxydes à valence mixte, grains fins, ou submicroniques et puis maintenant nanométriques (nanomatériaux). » [I Rousset, 2006, p. 3].

⁷⁶ « j'étais plus attiré par la technique que par la nature chimique des espèces que l'on pouvait étudier avec » [I Vivien, 2004, p. 5]

réussi, de reconnaître la valeur des laboratoires Rouxel ou Livage. Il est d'ailleurs personnellement proche de ce dernier. Pour le troisième type de réponse, si Hérold présente la même configuration de carrière que Rousset : un seul sujet peu à peu intégré à la chimie douce, il est avant tout un minéraliste qui a vécu la transition vers la chimie du solide. Se sentant moins lié à la chimie douce que Rousset, il critique plus facilement le bien fondé de l'appellation en lien avec sa propre pratique : il travaillait parfois à plusieurs centaines de degrés. Caro, s'il est de la génération intermédiaire entre Hérold et les autres, a vécu dans un laboratoire marginalisé – quoique efficace – de la communauté à l'interface de problématiques très diverses. Il a donc simultanément subi une pression sociale (mandarins mais aussi CNRS) tout en naviguant transversalement par rapport à la discipline, ce qui, ajouté à une certaine insoumission, a pu le rendre suspicieux vis-à-vis de ce qu'il considère comme un effet de mode. Même si les interprétations personnelles ne collent pas toujours à la situation professionnelle – le libre-arbitre compte aussi –, ces quelques cas montrent combien les avis personnels dépendent d'une trajectoire personnelle. Chaque carrière détermine partiellement une lecture de l'histoire et réciproquement chaque regard influence la carrière. Au passage, cette constatation montre l'absurdité du concept d'« expert indépendant » puisque tout expert est le fruit d'un milieu culturel donné.

Dans le débat entre « anciens » et « modernes », la tentation est toujours grande de privilégier une lecture à rebours de l'histoire, conduisant à des raccourcis simplificateurs voire à des anachronismes. Au niveau historique, parler de chimie douce en 1960 a peu de sens. Ceci étant, un ancien élève de Collongues, Philippe Colomban, propose une vision originale de la « chimie douce » (domaine auquel il se rattache mais où il ne se sent pas suffisamment reconnu). Il tranche la question de la « modernité » en la supprimant : le « sol-gel existe dans la nature (tout existe dans la nature !) » [I Colomban, 2003, p. 4]. Extrêmement naturaliste – lui-même se dit « géologue » de cœur –, cette vision rejoint l'idée « bio-mimétique » de Livage dans son article de 1977. Elle a surtout pour but ici de supprimer toute prétention à la primauté – celle de Livage en l'occurrence –. Colomban s'appuie sur sa propre expérience, ancien élève de l'École de céramique de Sèvres, pour citer toute une littérature de « technologie céramique traditionnelle », souvent ignorée par les chimistes contemporains.⁷⁷ La tactique de l'oubli pour affirmer une rupture plus grande est une technique bien rôdée. Il va plus loin dans la suite de son raisonnement en proposant une filiation historique pour le sol-gel, à la conjonction de quatre influences : la céramique traditionnelle ; un laboratoire américain – Sandia – ; la chimie des silicates portée, entre autres, par le chimiste américain Rustom Roy (présent au congrès de Bordeaux en 1964) ; tout un courant de sol-gel biologique, lié aux travaux de l'US Air Force. Même si ce choix de filiation semble quelque peu partial (en favorisant certains noms propres par exemple), il offre une alternative historique à l'idée de fondation, trop facilement acceptée quand il s'agit de nouveauté.⁷⁸

⁷⁷ « il y a une abondante littérature que les chimistes ignorent ou veulent ignorer pour présenter leurs travaux comme des nouveautés. Il s'agit d'une littérature des années 30 à 50 - Norton, Jouenne etc. -. Littérature en allemand, en français mais peu en anglais. Livage a voulu présenter le sol-gel comme quelque chose de nouveau. Ma position à moi c'est que le sol-gel est la transposition de la technologie céramique traditionnelle à de nouvelles compositions par une étape qui est la synthèse chimique d'objets nanométriques, comme les particules d'argile, où comme la proportion d'atomes à ou près de la surface est dominante développent des propriétés analogues permettant une mise en œuvre sol-gel. » [I Colomban, 2003, p. 4].

⁷⁸ « La chimie des sol-gels a démarré à l'époque où on découvrait que, à partir de précurseurs organiques, on pouvait faire de la chimie inorganique. À mon avis elle se situe au confluent de quatre courants : la céramique traditionnelle ; Sandia, la laboratoire américain avec J. Haertling qui a aussi inventé le Rainbow©, (l'usage de la piézoélectricité marié à un métal ou un polymère pour faire des actionneurs complexes comme battre les ailes de drones ou autre) ; Rustom Roy, de Penn State qui a fait de la chimie des silicates dans les années 50 ; et enfin Joe Mazdiyasi de USAF-Base et B.E. Yoldas, un Américain qui a travaillé je crois aussi avec Larry Hench, l'inventeur des applications en biologie du sol-gel, il y plus de vingt ans. Des verriers (comme Dislich et la

Quand on change de pays, d'autres filiations sont proposées par les praticiens. Ainsi un auteur britannique, R.W. Jones, propose un rapide historique du sol-gel dans un ouvrage scientifique, *Fundamental Principles of sol-gel technology*. Lui aussi n'hésite pas à faire remonter la technologie sol-gel aux années trente.⁷⁹

Ainsi, placer une limite entre « ancien » et « moderne », entre rupture et continuité, dépend en grande partie du point de vue et du vécu de chaque témoignage. À moins de s'entendre sur des critères communs, c'est le caractère, la pratique quotidienne et la situation professionnelle de chacun qui induisent une réponse, nécessairement locale et personnelle. Qu'il y ait une telle diversité de critères parmi les acteurs pose la question de l'identité propre de la chimie douce. Par exemple, quand Livage parle de chimie douce, il pense avant tout « sol-gel » alors que Hérold l'envisage plutôt suivant les composés d'intercalation. Y a-t-il unité épistémologique, construction d'une communauté ou simple assemblage rhétorique de plusieurs groupes ? Il est difficile d'être catégorique. Il semble pourtant que la forte communauté de chimie du solide française occupe le paysage du solide minéral et offre un cadre agréable pour la chimie douce : celle-ci ne semble pas faire l'objet d'une attention spécifique de la part du CNRS, mis à part quelques actions ponctuelles comme le « GRECO sol-gel », ni constituer un enseignement à part entière à l'université.⁸⁰ L'unité est d'autant plus improbable qu'une multiplicité des voies chimiques fleurit avec les sols-gels, la méthode des précurseurs organiques, l'intercalation...

VI.1.3. De l'actualité des synthèses à basse température à la « chimie des solides »

La chimie douce ressemble plus à une réaction contre l'hégémonie des hautes températures des années soixante (V.1.2.3) qu'à un mouvement cohérent. Plusieurs champs de recherche se développent à partir des années soixante-dix mais restent hétérogènes : à Livage et son école, à Colomban et Boilot, le sol-gel ; à Rouxel, Tournoux ou Hérold, les composés d'insertion, à Figlarz la réactivité des solides ; à Rousset la méthode des précurseurs organiques... S'ils occupent des groupes différents, ils se construisent aussi à des rythmes différents : cycle *Reactivity of solids* tous les quatre ans depuis 1948 ; cycle *International Symposium of Graphite Intercalation Compounds* tous les deux ans, lancé à La Napoule (France) en 1977, qui devient *International Symposium of Intercalation Compounds* par la suite⁸¹ ; cycle sol-gel tous les deux ans à partir de 1981... La chimie douce constitue plus un label de reconnaissance (au sein de la chimie du solide) qu'une communauté homogène.

Société Schott dans les années 40-50, les japonais S. Sakka et K. Kamiya, plus tard) avaient brevetés et étudiés l'hydrolyse de la silice, mais sans sentir de mon point de vue la richesse du procédé. » [I Colomban, 2003, p. 4].

⁷⁹ « Some of the earliest work on sol-gel appears to have been reported by [K.B.] Blodgett in 1935. Forty five years ago, [W.] Geffcken and [E.] Berger, who were working for Jenear Glaswerk Schott at the time in Jena, patented oxide coatings that they had prepared by the sol-gel method. » [Jones, 1989].

⁸⁰ À l'université Paris VI par exemple, le « sol-gel » est enseigné dans le DEA « chimie des matériaux ». « Sol-gel n'est pas encore un sujet académique et les jeunes ont tendance à aller vers ce qu'ils ont appris à l'école. Néanmoins les sols-gels attirent les jeunes. » [I Livage, 2003, p. 4].

⁸¹ « À partir de 1977, le CNRS a commencé à financer l'intercalation. Le congrès de La Napoule a été le premier des *International Symposium of Graphite Intercalation Compounds* (ISGIC), qui se tiennent tous les deux ans depuis 1977 dans un pays différent à chaque fois. Par la suite, les réunions ont été étendues à toutes les structures d'accueil et ISGIC s'est simplifié en ISIC, constitué par plusieurs directeurs de laboratoire. » [I Hérold, 2007, p. 6].

En revanche, les synthèses à basse température renouvellent la matrice disciplinaire de la chimie du solide. Les hautes températures et le solide cristallin, qui constituaient un « dogme implicite » incontournable au cours des années soixante et soixante-dix, ne sont plus hégémoniques. Les hautes températures sont encore indispensables en chimie du solide « conventionnelle » et parfois même en chimie douce⁸² mais, à partir de la décennie 1975-1985, elles cessent d'être pensées comme la voie royale pour la synthèse de solides. Cet engouement pour les basses températures va de pair avec un déclin (relatif) du solide cristallin tridimensionnel. Les états physiques discrédités jusque-là, comme l'amorphe, deviennent plus attrayants. On peut ainsi noter la création du *Journal of Non Crystalline Solids* en 1968 puis son rapide succès.⁸³ Pour ne parler que la France, à un ouvrage de référence comme *Le solide cristallin* écrit par Collongues [1973] répond cinq ans plus tard *Le solide non cristallin* signé par Mazières [1978], les deux ouvrages étant édités aux Presses universitaires de France. Les synthèses à basse température, qui ont longtemps porté la mauvaise réputation d'une chimie (en solution) désuète sont mieux reconnues.

De multiples circonstances concourent à ce glissement paradigmatique : la chimie du solide a une reconnaissance suffisante pour ne plus craindre d'aller flirter avec les solutions ; une nouvelle génération – Mazières, Livage, Rouxel, Tournoux –, qui s'est lancée dans des voies différentes des hautes températures de leurs maîtres, arrive à maturité ; les multiples doutes culturels suite à Mai 68 (écologique, internationaliste, anticapitaliste) portent l'espoir qu'une autre chimie est possible ; une crise énergétique (V.2.2.1) pose la question d'une autre gestion de l'énergie, ce qui discrédite les hautes températures ; enfin, des contacts renouvelés avec d'autres disciplines connexes qui ont pu changer le « goût du jour », la physique avec les « cristaux liquides », et la biologie avec les « matériaux biologiques », [Mazières, 1978, p. 11].

L'affrontement des Anciens et des Modernes tourne autour des conditions opératoires. Alors que les hautes températures conduisent « inexorablement » (selon les lois de la thermodynamique) au produit le plus stable, qu'on qualifie de « thermodynamique », les basses températures permettent de favoriser tel ou tel produit en accélérant tel ou tel chemin réactionnel, ce qui conduit à de multiples produits « cinétiques », d'où la synthèse de nouvelles phases « métastables », non synthétisées par les hautes températures. Le solide cristallin tridimensionnel perd son statut épistémologique privilégié au cœur du paradigme à partir du milieu des années soixante-dix.⁸⁴ En particulier, le monocristal n'est plus le solide

⁸² La dépendance de la chimie douce vis-à-vis des hautes températures constitue un critère supplémentaire pour rendre compte de la non-émancipation du domaine en communauté. En revanche, les hautes températures ne sont plus synonymes de chimie du solide puisque c'est à la même période que les fours d'Odeillo quittent la section

⁸³ « Longtemps il en est résulté une séparation nettement hiérarchique entre les "bons" solides, cristallins, et les autres, les solides "amorphes" [...] les deux dernières décennies ont vu un changement radical d'attitude de la part de la communauté scientifique à l'égard des non-cristallins. Ce changement, certes favorisé par l'espoir d'applications, est manifestement dû aussi à un besoin de renouvellement de la physique du solide [...] L'une des preuves les plus remarquables de l'intérêt actuel suscité par les [solides non cristallins] est l'énorme accroissement du nombre de conférences et publications qui leur sont consacrées, un exemple particulièrement frappant étant le succès du *Journal of Non Crystalline Solids* (1968-) » [Mazières, 1978, p. 10-11].

⁸⁴ « L'essentiel des travaux des dernières années en chimie du solide a été consacré aux composés binaires ou ternaires bien cristallisés et monophasés. On commence à voir apparaître des travaux portant sur :

- des solides à organisation imparfaitement périodique (pseudo-périodes, structures modulées, etc...)
- des solides micro-hétérogènes présentant des domaines de structure et éventuellement des compositions différentes
- des solides présentant une désorganisation structurale dans une ou deux dimensions : composés intercalaires à désordres plans
- des solides amorphes ou vitreux. Dans ce domaine les études sont à leur début mais on peut fonder de grands espoirs sur les possibilités de passer dans des conditions chimiques bien précises de l'état organisé à l'état désorganisé (hypertrempe, irradiation, etc...)

sacralisé. Sans quitter son giron, la chimie douce constitue un ressort puissant qui relance la chimie du solide.⁸⁵ Les possibilités de synthèse se trouvent démultipliées : amorphes, composés granuleux, poreux, zéolithes*, gels, hybrides, composites... Comme le mélange se fait à basse température, les molécules organiques ou biologiques (qui brûleraient à haute température) peuvent être mélangées aux précurseurs minéraux.⁸⁶ La richesse synthétique de la chimie douce mélange les cartes « élémentaires ». À nouveau, comme au temps de la chimie de l'état solide (1950-1960), la référence « minérale » est mise en balance, ici non pas par l'état solide mais par une créativité chimique tous azimuts. Le renouveau chimique des années 1980, 1990 dépasse largement la chimie douce. C'est pour rendre compte de ce formidable foisonnement chimique en composés nouveaux que je reprends l'expression « chimie des solides » (utilisée dans le rapport de conjoncture de 1974), que je trouve plus juste pour désigner la chimie du solide des années 1980-2000.

Pourtant, fabriquer un composé original n'est pas suffisant pour le chimiste « moderne » : il veut et doit aussi le caractériser. S'il n'est pas possible de le caractériser, alors il n'est pas intéressant. Or, la diffraction des rayons X peine à donner des résultats probants pour des composés trop éloignés de l'ordre cristallin, comme le sont souvent les solides exotiques de la chimie douce. Le renouveau de l'activité de synthèse n'a pu s'opérer qu'avec un développement prodigieux des instruments de caractérisation et de modélisation.

VI.2. Révolution instrumentale : caractérisation et informatisation

VI.2.1. À nouveaux solides, nouvelles caractérisations physiques

VI.2.1.1. Dynamique instrumentale en sciences chimiques (1964-1982)

Le III^e et le IV^e Plans d'équipement économique et social de la France avaient permis aux laboratoires de chimie de l'état solide de se doter d'appareils de diffraction de rayons X (1956-1965). En 1964, le rapport préparant le V^e Plan rappelle l'importance des « équipements lourds » en chimie depuis que la « chimie physique » a investi les diverses composantes des sciences chimiques.⁸⁷ Grâce à des crédits généreux, le V^e Plan (1966-1970)

-
- des matériaux à structures bidimensionnelles et des surfaces
 - de l'état liquide. Il est probable que l'état liquide constituera l'un des pôles d'intérêt pour les années à venir
 - des matériaux polyphasés dont certains (composites, eutectiques orientés, etc...) suscitent déjà un intérêt général. » [RC CNRS, 1974, chimie, p. 8].

⁸⁵ « Cette ouverture a relancé la chimie du solide en lui montrant qu'il n'y avait pas que les monocristaux, les verres mais qu'on pouvait aussi faire des gels, des sols-gels... » [I Lucas, 2005, p. 8].

⁸⁶ « Par la chimie, à température ambiante, on peut mélanger de l'organique et du minéral, en gros tous les intermédiaires entre du plastique, du plexiglass et de la silice, du verre. Et parmi ces matériaux hybrides, il y a un petit volet qui ne s'est pas encore développé : celui où au lieu de l'organique on a affaire à du biologique. Il s'agit d'insérer des enzymes, des cellules, des bactéries, des choses comme ça et de les faire travailler dans du verre. » [I Livage, 2001, p. 2].

⁸⁷ « La nécessité pour les chimistes de disposer de gros centres de recherche équipés de matériel lourd est apparue depuis ces dernières années. En effet, l'introduction de la chimie physique dans toutes les branches de la chimie et l'évolution des méthodes d'analyse ou de contrainte ont conduit les chimistes à utiliser ou à participer

permet aux laboratoires de chimie de s'équiper en nouveaux instruments de caractérisation à la fin des années soixante. Le positionnement désormais central des instruments en chimie a deux effets d'ensemble. Premièrement, il intensifie la collaboration entre chimistes et physiciens parce que les physiciens sont indispensables à l'utilisation des appareils et à l'interprétation des résultats. Deuxièmement, en généralisant l'emploi de telle ou telle technique, il tend à rapprocher les chimistes de sections différentes autour d'un instrument donné. La dynamique instrumentale va dans le sens d'une réorganisation des sections chimiques du CNRS en un département en 1976. Plus spécifiquement, qu'en est-il de la chimie du solide ? L'analyse locale de quelques laboratoires-types a mis en évidence des logiques instrumentales fortes (IV.2, IV.3). Que se passe-t-il de manière plus générale pour l'ensemble de la communauté ? L'élargissement de l'angle de vue semble inscrire les comportements locaux dans un mouvement général.

En 1969, pour le VI^e Plan, le rapport de conjoncture de la section 14 – chimie minérale – prévoit des « changements importants dus à la technique » spécialement pour les solides. Il suggère un recours aux « techniques nouvelles » – RMN et RPE de haute résolution – pour étudier la liaison chimique. Celle-ci est d'ailleurs source d'intérêt pour la communauté internationale à partir de 1970 (III.3.1.3). Le rapport insiste aussi sur l'importance des « nouveaux moyens d'étude structurale » en plus de la diffraction des rayons X : « diffraction des neutrons, diffraction d'électrons lents, effet Mossbauer, RMN à large bande. » Le recours aux « très basses températures » devient alors essentiel, soit parce que le fonctionnement de l'appareil est gêné par l'agitation thermique, soit parce que les phénomènes étudiés (« résistivité, propriétés magnétiques, RPE, effet Mossbauer ») se produisent eux-mêmes à basse température. Par conséquent, l'utilisation de l'hélium liquide, qui permet d'atteindre des températures de l'ordre de 4K (- 269°C), doit devenir plus « systématique » pour les minéralistes [RC CNRS, 1969, p. 13-14].

Cinq ans plus tard, pour le VII^e Plan (1976-1980), l'accent est mis sur les « techniques de plus en plus fines analogues à celles de la physique » pour étudier le solide réel [RC CNRS, 1974, p. 10]. Car, solide ne signifie plus uniquement cristal parfait. Sont désormais étudiés des solides réels, dotés de structures plus exotiques : composés « imparfaits » (oxydes multiples, verres minéraux, polymères organiques, biopolymères), « divisés et poreux » (gels et catalyseurs variés) ou même « spéciaux » (bidimensionnels, membranes, rubans, fibres, composites). À cette diversification des composés est reliée l'évolution des caractérisations structurales. Pour les solides divisés ou poreux, les chimistes étudient désormais la « texture », c'est-à-dire la structure non plus atomique mais micrométrique (on dit mésoscopique, c'est-à-dire intermédiaire entre micro et macro). Pour les verres, l'analyse thermique constitue souvent un moyen simple de mesurer la température de transition vitreuse, T_g (VII.2.1). Le rapport préconise ainsi l'achat de « calorimètres pour basses et très hautes températures ». Enfin, il mentionne, pour affiner les études structurales, le recours à de « nouvelles sources de rayonnements », en premier lieu, le « rayonnement synchrotron »*. Celui-ci provient des accélérateurs de particules circulaires (cyclotron ou synchrotron). En effet, comme toute particule chargée rayonne une onde électromagnétique lorsqu'elle est accélérée, les accélérateurs de particules sont des sources potentielles de rayonnement. Longtemps réservés à l'usage exclusif des physiciens des hautes énergies, les anneaux de collision sont peu à peu colonisés par des équipes intéressées par les rayons X qui s'en échappent : plus intense, à spectre plus continu que les sources classiques, le rayonnement synchrotron permet de nouvelles caractérisations structurales par diffraction ou diffusion des rayons X. Le rapport suggère la collaboration des chimistes du solide avec le LURE

à la mise au point de produits ou d'appareillages et de techniques qui étaient considérées comme relevant d'autres disciplines, de la physique, notamment. » [MIN, 1966b, p. 119].

(Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique), installé à proximité de l'Anneau de collision d'Orsay (ACO).⁸⁸

Certains solidistes – Jean Galy, Hervé Dexpert – participent aux commissions du LURE. Ce laboratoire de prestation de services permet d'utiliser la technique EXAFS (*Extended Absorption Fine Structure*) pour caractériser les solides exotiques grâce à une technique spectroscopique fine. Si pour le solide cristallin la diffraction des rayons X constitue encore la base, il n'en est pas de même pour les amorphes ou les gels. Le nouveau credo des solidistes consiste à croiser les techniques de caractérisation, à utiliser leur complémentarité afin de dégager un maximum d'informations. Le couplage d'au moins deux techniques pour caractériser un solide complexe constitue l'une des évolutions majeures de la chimie du solide sur la période 1970-1990. Pour « un amorphe il faut tout combiner : l'infrarouge, la spectroscopie Raman, la spectroscopie Mössbauer, l'EXAFS, tous les phénomènes de spectroscopie d'absorption des rayons X » [I Galy, 2006, p. 26]. Pour le sol-gel, on passe d'un état liquide initial à un état solide au final : le suivi et la caractérisation des réactions nécessitent donc une technique valable tout au long du processus (en particulier dans les milieux initial et final). La résonance magnétique nucléaire (RMN) constitue la technique de choix pour le sol-gel. On la couple éventuellement avec l'absorption des rayons X (XAS).⁸⁹ Un apprentissage de la spectroscopie devient nécessaire. Ainsi, Livage et Vivien organisent un « séminaire RMN – RPE en chimie du solide » en septembre 1978 à Redon dont les actes [Livage & Vivien, 1978] sont encore régulièrement consultés aujourd'hui.⁹⁰ À ce séminaire, Livage assure les présentations en RMN tandis que Vivien, son élève Didier Gourier et Jacques Darriet (ancien élève de Galy) présentent les subtilités de la RPE.

En résumé, à partir de la fin des années 1960, la chimie du solide est dynamisée par un renouveau instrumental (qui touche l'ensemble de la chimie). Le mouvement provient de l'industrie : l'industrie des matériaux, en demande d'instruments (besoin de contrôle), crée la commercialisation d'appareils standardisés. Dans un deuxième temps, la politique scientifique (par son financement) et la compétition internationale conduisent à un achat massif d'instruments de caractérisation.⁹¹ La multiplication des moyens d'investigation structurale permet de caractériser d'autres solides que les cristaux tridimensionnels, qui étaient favorisés jusque-là. De manière parallèle au solide cristallin, la diffraction des rayons X connaît un déclin (relatif) parmi les techniques du laboratoire même si elle demeure l'outil de base pour les cristaux. C'est au cours des années soixante-dix que la cristallographie amorçe un déclin au sein des laboratoires de chimie du solide au profit de la physico-chimie.⁹² Même dans un laboratoire hétérodoxe, la diffraction des rayons X reste une technique très utile au cours des

⁸⁸ Depuis 1971, une « commission » de physiciens s'est constituée pour récupérer le « rayonnement synchrotron » rayonné par l'ACO mais ce n'est qu'en janvier 1974 qu'elle se constitue officiellement en LURE [RC CNRS, 1974, physique, p. 88].

⁸⁹ « *BBV : Quelles sont les opérations que vous faites avec ces gels ? Quel genre de techniques utilisez-vous ?* – JL : La caractérisation des gels n'est pas facile. Ce sont des systèmes qui ne sont pas cristallins. La technique la plus importante c'est la RMN et puis l'absorption X, les XAS. » [Livage, 2001, p. 3]

⁹⁰ En consultant ce document à la Bibliothèque interuniversitaire de Jussieu, j'ai noté qu'il était encore régulièrement emprunté entre 1995 et 2007.

⁹¹ « On a beaucoup profité du développement de l'instrumentation à cette époque-là, surtout venant de l'industrie et à la demande de l'industrie : l'industrie avait besoin de contrôle ! » [I Caro, 2005, p. 27].

⁹² « *PT : Est-ce que ça veut dire qu'il y a un savoir de cristallographie qui se perd ?* – JG : Qui s'est perdu ! Il y a une exigence qui s'est perdue en cours de route. » [I Galy, 2006, p. 25]. Lors de sa présentation aux 150 ans de la SFC (18 juillet 2007, 17h30-18h), Patrick Maestro, ancien étudiant en thèse à Bordeaux au cours des années 1970, a tenu à remercier (outre Hagemmuller et Pouchard) Galy pour les cours de cristallographie passionnants dont il a été chargé à l'université de Bordeaux. Il ajoute qu'il n'était que deux étudiants à suivre ces cours, ce qui montre le déclin de la diffraction des rayons X à cette époque.

années quatre-vingt.⁹³ En revanche, pour les déterminations structurales plus fines des cristaux ou pour les solides désordonnés (amorphes, grains fins, gels), elle est jugée insuffisante. Pour les amorphes par exemple, elle donne un diagramme blanc. Spectroscopie, microscopie électronique ou diffusion des rayons X sont popularisées parmi les solidistes. La relation structure-propriétés, loin de perdre sa pertinence, voit au contraire son domaine d'action grandir puisque, désormais, la structure inclut non seulement l'échelle atomique mais encore la microstructure. Chaque laboratoire s'équipe suivant ses propres besoins instrumentaux, eux-mêmes liés au type de solides qu'il synthétise, même si, souvent encore, ce sont les physiciens qui assurent la plupart des caractérisations (d'où l'intérêt des collaborations). À l'équipement instrumental s'ajoute un besoin en personnel qualifié pour le faire fonctionner. Lorsque l'ampleur des investissements nécessaires dépasse les capacités d'un laboratoire de chimie, on peut recourir à des services communs issus de la « *big science* » comme le LURE. Au début des années 1980, l'« instrumentation scientifique » continue d'être un domaine stratégique. Inscrite parmi les seize domaines prioritaires en « recherches appliquées et finalisées » de la loi d'orientation R&D de 1982, elle apparaît aussi comme une nécessité incontournable en « recherche fondamentale » en particulier via les grands instruments dans une perspective européenne [MIN, 1982].⁹⁴

Les études de cas rencontrées ont montré combien la logique instrumentale a été déterminante en chimie du solide : l'analyse thermique pour les diagrammes de phase (IV.1), la spectroscopie pour les terres rares (IV.2), la RPE pour les matériaux oxydes lasers (IV.3), la RMN pour le sol-gel (VI.1.2), la diffusion des électrons pour les oxydes mixtes divisés (VI.1.1). Pour rendre plus palpable encore l'importance instrumentale, je vais relater brièvement l'histoire d'une controverse internationale qui a opposé les tenants d'une conception « thermodynamique » des défauts dans les solides à ceux qui lui préfèrent une conception structurale. Dans cette controverse cognitive, un instrument – la microscopie électronique – va jouer un rôle essentiel pour mener à un consensus.⁹⁵

VI.2.1.2. La microscopie électronique entre visions « thermodynamique » et « structurale » : controverse, consensus et conséquences.

Au cours des années 1960, les bronzes de vanadium commencent à faire la gloire du Laboratoire de chimie minérale structurale, dirigé par Hagemmuller (IV.4.1.4). Les chimistes

⁹³ « Le premier gros équipement du laboratoire entre 1978 et 1980 a été un diffractomètre de rayons X et le premier Maître de Conférence nommé au laboratoire en 1983 fut cristallographe. » [I Bonino, 2006, p. 1].

⁹⁴ Dans l'annexe de la loi d'orientation (chapitre III), parmi les quatre rubriques de la « programmation des moyens financiers », on trouve « b) la recherche fondamentale » dont « Connaissance de la matière : des outils de plus en plus lourds sont utilisés par les physiciens, chimistes, biologistes, géologues pour étudier des atomes, des molécules, des solides, des composés biologiques. Ces outils sont les réacteurs, sources de neutrons, de l'[ILL], à Grenoble, et de l'institut Léon-Brillouin, à Saclay. Les anneaux de stockage d'électrons, sources de rayonnement synchrotron, constituent une nouvelle génération de tels outils actuellement en plein développement [...] Super-Aco (anneau de collision d'Orsay) [...] collision dans l'igloo (DCI) [...] projet] un nouvel anneau de rayonnement synchrotron, optimisé pour la production de rayons X et dont la construction pourrait être entreprise avec des partenaires européens. » [MIN, 1982].

⁹⁵ L'histoire que je raconte ici m'a été suggérée, en grande partie, par Jean Galy, dont je suivrai le point de vue en le critiquant en fonction des sources dont je dispose (citées par lui ou autres) et d'autres témoignages mentionnant la non stœchiométrie et la microscopie électronique. Il s'agissait d'autant plus de préciser ce biais avant de commencer que le principal narrateur se dit appartenir au camp des « vainqueurs ». Cependant, la controverse est suffisamment importante, sa dimension suffisamment internationale, le rôle des instruments (en particulier la microscopie électronique) suffisamment déterminant pour la raconter ici. D'autre part, elle offre l'occasion à l'histoire de montrer dans quelle mesure, partant du récit des vainqueurs, elle peut le retourner partiellement pour prendre en compte d'autres hypothèses.

bordelais étudient la structure de ces oxydes non stœchiométriques par diffraction des rayons X, qui est devenu leur outil de base. Sur les questions de non stœchiométrie, Collongues et Flahaut font forte impression aux étudiants d'Hagenmuller aux séminaires à Bordeaux.⁹⁶ La non stœchiométrie, d'abord étudiée en chimie de l'état solide (II.4), constitue encore un sujet d'actualité à la fois en raison des applications potentielles mais aussi parce qu'elle pose de nombreuses questions structurales. À cette époque, l'interprétation thermodynamique va de soi pour la plupart des chimistes, cristallographes ou physiciens à travers le monde.⁹⁷ La non stœchiométrie est due à la présence de défauts ponctuels (« lacunes » d'oxygène par exemple dans le protoxyde de fer, noté FeO_{1-x}) dispersés aléatoirement dans le solide. Le composé solide est constitué d'une seule phase homogène dans laquelle les défauts sont statistiquement répartis : c'est la vision « thermodynamique », développée à partir des travaux de Wagner et Schottky dès les années trente, en Allemagne [Schottky & Wagner, 1930]. En France, les chimistes du solide inclinent aussi vers ce cas de figure à la fin des années soixante. La position de Collongues, considéré comme l'un des spécialistes français de la non stœchiométrie, semble le confirmer.⁹⁸

Au milieu des années 1960, une nouvelle hypothèse est avancée sur la scène internationale. La non stœchiométrie résulterait de l'association d'une multitude de micro-domaines (ou « blocs »), collés les uns aux autres. Chaque micro-domaine aurait une composition chimique donnée (stœchiométrique) mais l'édifice solide global, juxtaposition de micro-domaines différents, serait quant à lui non stœchiométrique : c'est la vision « structurale » du solide cristallin. L'école australienne en particulier, emmenée par le cristallographe J. Allpress et le cristalochimiste Arthur Wadsley, deux chercheurs du CSIRO (équivalent du CNRS australien) à Melbourne, défend cette hypothèse en rupture avec le consensus international. Dès 1966, Wadsley, secondé par le chimiste suédois Sten Andersson (venu faire un postdoc avec lui), propose un mécanisme de formation de micro-phases dans lequel les défauts interstitiels ne jouent qu'un rôle transitoire lors de la formation des micro-phases avant de disparaître à terme.⁹⁹ Au niveau occidental, l'affrontement quasi-idéologique se polarise bientôt entre deux principales écoles rivales : l'école structurale australo-suédoise (même si Wadsley décède en janvier 1969) et l'école thermodynamique anglaise, emmenée par J.S. Anderson. Tous les coups sont permis, les hostilités ouvertes, la guerre devient « sanglante ».¹⁰⁰

⁹⁶ « Parmi les gens qui ont bien développé les concepts de la non-stœchiométrie, j'ai été très marqué par Collongues et Flahaut aux séminaires de Bordeaux. » [I Tournoux, 2006, p. 9].

⁹⁷ « *Variation in the composition of a solid has usually been unquestioningly attributed to vacancies or interstitials.* » [Allpress & al., 1969, p. 1163].

⁹⁸ « Collongues est aussi un des pères de la non-stœchiométrie. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 16]. Dès sa thèse (1947-1954) en effet, Collongues s'intéresse au concept de non stœchiométrie. Au conseil Solvay (1956), il présente une communication sur ce thème au même titre que Bénard, Forestier ou le chimiste britannique de l'*Imperial College*, R. Barrer [Solvay, 1956]. Il est par exemple invité à Bordeaux au cours des années 1960 pour donner des communications : « Parmi les gens qui ont bien développé les concepts de la non-stœchiométrie, j'ai été très marqué par Collongues et Flahaut aux séminaires de Bordeaux. » [I Tournoux, 2006, p. 9]. « Collongues était un grand spécialiste de la non stœchiométrie, vous le savez » [I Pouchard, 2004, p. 20]. Enfin, lors de la sixième saison du Séminaire de chimie de l'état solide (1971-1972) portant sur « Diagrammes de phases et stœchiométrie », c'est lui qui est sollicité pour préfacer l'ouvrage [Suchet, 1973].

⁹⁹ « *Vacancies and interstitials are a necessary transient when one of these phases is forming, and play an important part in the movement of shear planes by a cooperative mechanism that has been proposed in outline* [Andersson & Wadsley, *Nature London*, 1966, 211, p. 581] » [Allpress & al., 1969, p. 1163].

¹⁰⁰ « Cette école de chimie [australos-suédoise] était en conflit tout à fait ouvert avec l'école anglaise de J.S. Anderson qui a mené une politique destructive pour casser la carrière de Wadsley, son équipe a été très loin. On sortait de la controverse scientifique pour arriver quasiment à de l'agression professionnelle. La guerre a été vive entre la communauté Wadsley-Andersson et les Anglais, aujourd'hui de tels affrontements n'existent plus, ça a vraiment été saignant ! » [I Galy, 2006, p. 5].

Un article, paru en 1969 dans la « Bible » des cristallographes – *Acta Crystallographica* –, jette un pavé dans la mare thermodynamique. Allpress, Sanders et Wadsley utilisent des clichés expérimentaux pour « montrer » les micro-domaines ou blocs [Allpress & al., 1969].¹⁰¹ L'opposition essentiellement spéculative se focalise désormais autour d'un instrument : la microscopie électronique. L'équipe australienne travaille sur des oxydes de niobium et de tungstène : $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-WO}_3$. La diffraction de rayons X en fournissant une moyenne statistique sur un grand nombre de plans ne permet pas de conclure quant à la présence de structures à blocs.¹⁰² C'est pourquoi les cristallographes ont choisi de coupler la diffraction X à deux autres techniques qui lui sont complémentaires : la diffraction des électrons (de longueur d'onde plus faible que les rayons X (VI.1.1.2)) et la microscopie électronique. Celles-ci présentent des avantages par rapport à la diffraction X : de petits monocristaux suffisent pour être caractérisés, les mesures sont rapides, l'enregistrement prend en compte toutes les réflexions (sur les plans) d'une zone observée, on obtient des images du réseau (« *lattice images* »), on peut déduire le groupe d'espace... [p. 1156]. Des clichés de microscopie électronique sont fournis dans l'article. L'un d'entre eux (« figure 4 ») est reproduit ci-dessous :

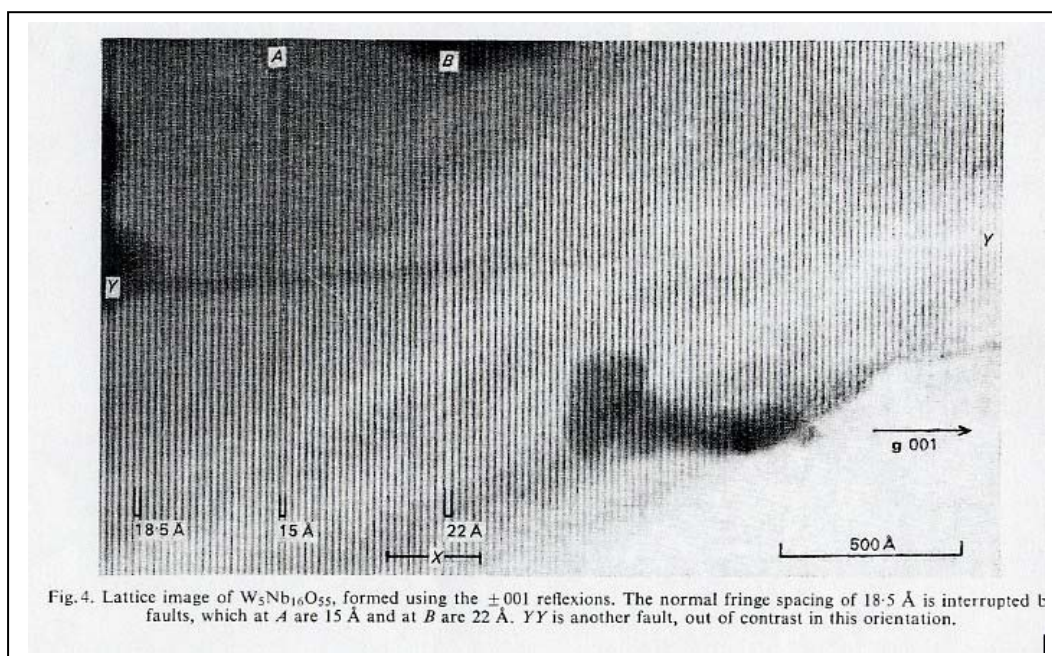


Fig. 4. Lattice image of $\text{W}_5\text{Nb}_{16}\text{O}_{55}$, formed using the ± 001 reflexions. The normal fringe spacing of 18.5 Å is interrupted by faults, which at *A* are 15 Å and at *B* are 22 Å. *YY* is another fault, out of contrast in this orientation.

Le cliché présente l'image d'un réseau sous forme de franges (« *fringes* ») équidistantes, d'épaisseur 18,5Å dans le cas de $\text{W}_5\text{Nb}_{16}\text{O}_{55}$. Cette régularité est interrompue de temps en temps par des franges d'épaisseurs différentes : 15 ou 22Å, ce qui est visible sur la « figure 4 ». Selon les auteurs, ces irrégularités de franges montrent (« *show* ») des blocs (« *one structure of fragments* ») de composition variable, séparés par des cisaillements cristallographiques (ou plans de cisaillement : « *shear planes* »). Chaque fragment qui interrompt l'ordre cristallographique est considéré comme une région de défauts (« *faulted* »

¹⁰¹ « C'était dans *Acta crystallographica* de 1969, un article extrêmement important sur la non-stœchiométrie. [...] c'était avec Allpress qu'ils ont fait les premières photos qui permettaient de comprendre les structures à blocs » [I Galy, 2006, p. 6].

¹⁰² « *there is some chemical evidence that many of these dual-valency or mixed-oxide niobium phases may have very small but reproducible regions of homogeneity, with the ideal composition representing one of the limits. The way in which this non-stoichiometry is accommodated within the crystals has not been resolved by X-ray diffraction techniques, because these provide only statistically averaged structures, with details of compositional and crystalline imperfections observed.* » [Allpress & al., 1969, p. 1156].

regions ») au sein de la matrice cristalline régulière. Comme la taille des franges de défauts varie entre dix et vingt angströms, les auteurs en déduisent que les blocs contiennent trois à six octaèdres (sur leur largeur). Les octaèdres (formés par un cation métallique central, Nb ou W ici, lié à huit atomes d'oxygène) sont considérés comme les briques élémentaires. Des mesures de micro-densité viennent confirmer ces résultats. Les blocs auraient des formules du type : $W_{12}Nb_{12}O_{33}$ (bloc de 4*3 briques), $W_3Nb_{14}O_{44}$ (4*4), $W_5Nb_{16}O_{55}$ (5*4), $W_8Nb_{18}O_{69}$ (5*5)... Ces formules sont, elles, déduites de la diffraction des rayons X [p. 1158]. La composition non stœchiométrique totale résulterait ainsi d'une moyenne faite sur chaque type de blocs (en nombre différents) comme le suggère le calcul suivant : « *Slight changes in the overall stoichiometry of the crystal result from the presence of the faulted regions, because their composition is different from that of the matrix. A simple calculation illustrates this for Fig. 4. [...] there are about 125 normal 18,5Å fringes corresponding to $W_5Nb_{16}O_{55}$, four of 15Å characteristic of $W_3Nb_{14}O_{44}$, and two of 22Å due to the 6*4 blocks of ' $W_7Nb_{18}O_{66}$ '. The average composition of the region shown in the micrograph is, therefore,*

$$125(W_5Nb_{16}O_{55}) + 4(W_3Nb_{14}O_{44}) + 2(W_7Nb_{18}O_{66}),$$

*giving a fractional formula $MO_{2,6187}$ which may be compared with $MO_{2,6190}$ for fault-free $W_5Nb_{16}O_{55}$. The effects of the two 22Å faults are cancelled by the two 15Å faults, and the same change of composition would have been reached by inserting only two 15Å faults consisting of 4*4 blocks in the matrix of 4*5 blocks.* » [p. 1163]. Ainsi, l'article conclut à la présence de micro-domaines composés de briques élémentaires qui s'intercalent au sein de la matrice ordonné. C'est la non périodicité d'apparition des blocs (stœchiométriques et microscopiques) qui rend compte de la non stœchiométrie de l'édifice cristallin macroscopique. Les micro-domaines sont assimilés à des défauts plans (« *planar faulted regions* ») résultant de la croissance partielle d'un micro-domaine avec l'autre (« *representing the partial intergrowth of one phase with another* »). Suite à cet article, les années 1970 seront agitées par ces questions d'« *intergrowths* » dans les composés non stœchiométriques.¹⁰³

Ainsi, l'interprétation « structurale » contredit pied à pied l'interprétation « thermodynamique » : micro-domaines séparés par des cisaillements plans contre phase macroscopique homogène, « défauts étendus » contre défauts ponctuels, observations structurales contre théories statistiques... Pour les cristallographes australiens et leur camp, les lacunes d'oxygène, ponctuelles, ne sont que des créations de l'esprit peut-être valables pour interpréter des phénomènes macroscopiques mais qui ne correspondent pas à la structure atomique réelle.¹⁰⁴ Wadsley, Allpress et Sanders insistent sur la pertinence de leurs conclusions parce qu'elles s'appuient sur une approche expérimentale plus poussée : « *a more critical experimental approach* » que leurs adversaires. Les tendances cristallographiques et thermodynamiciennes s'affrontent alors en deux visions irréconciliables de la matière cristalline. L'école britannique met au contraire en doute la pertinence des observations de microscopie électronique et ne croit pas qu'elles montrent vraiment les images du réseau cristallin. Comme les clichés de microscopie électronique ne sont pas à proprement parler des images mais doivent être recalculés pour ressembler à des images, la remarque est

¹⁰³ « finalement WO_{3-x} n'existe pas, c'est toute une série de phases parfaitement organisées par suite de cisaillements cristallographiques, c'est-à-dire que pour les structures où l'oxygène s'en va, les octaèdres ne restent pas sans oxygène autour, clac!, ils mettent des arrêtes en commun pour compenser le fait que les oxygènes sont partis. Ça a été le grand truc en 1969 ! Ensuite il y a eu les « *intergrowths* » entre phases. » [I Galy, 2006, p. 4].

¹⁰⁴ À partir de 1967, les cristallochimistes – en particulier Galy – sont en contact avec Andersson en « J'étais dans ce groupe Wadsley-Andersson qui pensait que la non-stœchiométrie dans les oxydes n'était pas due à un oxygène qui s'en va de temps en temps en laissant des atomes sans liaison – pour nous, c'est zéro, ça n'existe pas – » [I Galy, 2006, p. 4].

intéressante. Le débat tourne ainsi autour de la crédibilité des clichés microscopiques. Peuvent-ils être crus en tant qu'images de la matière ? Si non, que représentent-ils du solide cristallin ? Ce faisant, quelle place prend la microscopie dans la construction de la preuve ? Ceux qui y croient peuvent considérer l'article de 1969 comme une « expérience cruciale » au sens épistémologique¹⁰⁵ mais la clôture de la controverse n'est pas aussi simple.

En France non plus, la situation n'est pas tranchée. Quatre ans après l'article des Australiens, en 1973, Collongues la résume ainsi : « il est frappant de constater à quel point les voies d'approche structurale et thermodynamique de la non stœchiométrie restent distinctes. Cette situation est d'autant plus préoccupante que « structuristes » et thermodynamiciens ont, au cours des dernières années, progressé à pas de géant sans parvenir, le plus souvent, à trouver un centre d'intérêt commun. » [Suchet, 1973, préface]. Face à face s'affrontent les diagrammes de phase (macroscopiques) et les clichés de phases microscopiques. Les « structuristes » cherchent à placer la microscopie électronique au cœur de la controverse au cours des années 1970. Les clichés pourtant ne constituent pas une preuve irréfutable puisque les deux interprétations, diamétralement opposées, continuent de coexister. La situation est complexe. Certes, un héritier de JS Anderson, Bruce Hyde, se rallie bientôt à l'interprétation de l'école australo-suédoise, devient professeur à Leyde et collabore désormais avec Andersson (Sten).¹⁰⁶ L'interprétation thermodynamique n'a pas pour autant disparu. Serait-elle adaptée à certains solides non stœchiométriques et pas à d'autres ? À certaines conditions de température ? Reste-t-elle globalement valable pour les chimistes au niveau macroscopique et à haute température ?

Mon hypothèse est la suivante : les « thermodynamiciens » et les « structuristes » ne sont pas parvenus à un consensus total – qui aurait conduit à une exclusion de l'une des deux ou à leur intégration en une nouvelle interprétation – parce qu'ils forment deux communautés partiellement distinctes, c'est-à-dire que leurs horizons ne coïncident pas vraiment. Ainsi, même si le sixième Séminaire de chimie de l'état solide rassemble des laboratoires de thermodynamique, de cristallographie et de chimie minérale, l'ouvrage qui en résulte est divisé en deux parties distinctes : « approche thermodynamique » (Cohen-Adad par exemple à Lyon) et « approche physico-chimique et structurale » (Caro, Collongues, Casalot, Fruchart, Durif).¹⁰⁷ Même si la dichotomie semble placer la plupart des chimistes du solide parmi les « structuristes », seul Caro emploie le mot « micro-domaine » et utilise lui-même la microscopie électronique dans son laboratoire (IV.2.3), les autres se réclament surtout de l'approche structurale par diffraction des rayons X.

Il semble que la lecture que chacun peut avoir de l'« événement » dépend grandement du milieu où il a vécu. Galy, qui m'a conté cette controverse, est au fond le Français qui était

¹⁰⁵ Pour approfondir la question de la signification des images en microscopie, on pourra se référer à une thèse récente sur *La production et la fonction des images en physique des matériaux et astrophysique* [Allamel-Raffin, 2004] qui traite en particulier de quatre microscopes l'IPCMS à Strasbourg : MEB, MET, STM, AFM.

¹⁰⁶ « Il y a un scientifique de cette école [anglaise], Bruce Hyde, un très grand spécialiste de microscopie électronique appliquée aux défauts dans les réseaux inorganiques, qui a écrit dans un article mémorable disant finalement que c'était Wadsley qui avait raison et que son école avait une interprétation erronée des choses. Hyde [...] a fait des choses magnifiques en microscopie électronique, mais après, sur les oxydes de titane, sur les défauts étendus avec notamment les « *swinging shear planes* ». Il est devenu professeur à Leyde, en Hollande, il a pris une chaire et continue à travailler avec Sten Andersson mais plus jamais avec J.S. Anderson. » [I Galy, 2006, p. 5].

¹⁰⁷ Les laboratoires se réclamant de l'approche thermodynamique sont les suivants : « thermodynamique et physico-chimie métallurgiques » (ENSEEG, Saint-Martin d'Hères, M. Allibert et I. Ansara), « chimie » (Mines de Saint-Étienne, M. Soustelle, J.-J. Gardet, B. Guilhot), « chimie thermodynamique » (Orsay, M. Dodé), « composés non stœchiométriques » (Orsay, P. Gerdanian), « physicochimie minérale » (Lyon, Cohen-Adad). Ceux qui sont rangés dans l'approche « structurale » sont : CECM (Fruchart), LTR (Caro), LCMS (Bordeaux, Casalot), LCAES, « rayons X » (Grenoble, A. Durif), « chimie » (Pau, S. Gromb), « Structures et propriétés des sulfures des métaux de transition » (Toulouse, Y. Jeannin).

le plus proche des « structuristes ». Parti faire un postdoc en Suède avec Andersson en 1969-1970, il se range sans hésitation du côté des micro-domaines et de la microscopie électronique et a posteriori présente la controverse comme une défaite sans appel des thermodynamiciens. Caro et Hervé Dexpert, tous deux issus du Laboratoire des terres rares et proches de la microscopie électronique, proposent la même analyse que Galy : une clôture du débat scientifique par la preuve instrumentale.¹⁰⁸ Il semble que la controverse ait fait rage en 1972 au congrès international l'*American Chemical Society* à Washington.¹⁰⁹ Hyde l'évoque lui aussi dans la notice nécrologique qu'il rédige pour JS Anderson au début des années 1990 [Hyde, 1993]. On pourrait dire simplement que les vainqueurs ont raison.

Pourtant, les choses ne sont pas aussi simples justement. Il est évident que les « structuristes » se sont construit une mémoire commune : ainsi, Caro et Galy, qui ont vécu dans deux « écoles de recherche » différentes au niveau national (IV.2, IV.4) partagent les mêmes références internationales et évoquent tous deux des souvenirs du congrès de Washington (1972), qu'aucun autre témoin français interrogé ne mentionne. Est-ce à dire que les thermodynamiciens ne veulent pas évoquer la défaite ? Qu'ils ont une mémoire sélective ? Il y a probablement un peu de cet oubli sélectif, plus ou moins conscient qui affecte chaque individu. Ce qui est extrêmement étonnant, c'est que Galy ne situe pas Collongues et son équipe sur les questions de non stœchiométrie mais uniquement sur les hautes températures.¹¹⁰ Comment est-ce possible que Galy ne le voit pas en non stœchiométrie des oxydes métalliques alors que Collongues reste l'un des spécialistes français du domaine au début des années 1970 ? Ne serait-ce pas parce qu'ils sont dans des communautés (internationales) différentes ? En 1979, dix ans après la publication de Wadsley, Collongues continue d'utiliser la notation des lacunes d'oxygène. Et il n'est pas le seul ! Encore aujourd'hui, certains font référence à ce type de notation, que Galy désavoue complètement.¹¹¹ La controverse n'est donc pas close comme l'assuraient les « vainqueurs » parce que des gens continuent de se réclamer d'une approche thermodynamique. À Orsay, le Laboratoire de physico-chimie des matériaux (fondé en 1977 par Alexandre Revcolevschi, un ancien élève de Collongues) pourrait très bien se placer dans la continuité d'une approche thermodynamique des matériaux.¹¹² Si aucun thermodynamicien n'évoque la controverse,

¹⁰⁸ « la microscopie électronique [...] a effectivement montré qu'il existait d'autres types de construction de la matière, autres que ceux imbriquant deux phases atome par atome pour en former une troisième. [...] La vision d'origine de la chimie du solide qui reposait sur la combinaison d'espèces atomiques électriquement plus ou moins chargées en fonction du degré de covalence/ionicité de la liaison chimique a donc du intégrer ces faits. Le solide à l'échelle nanométrique apparaissait alors dans de nombreux cas, notamment pour plusieurs familles d'oxydes, comme la juxtaposition plus ou moins ordonnée des micro-domaines déjà évoqués, blocs qu'il était difficile de disloquer. Cela a été le début de l'explication d'une bonne partie de ce qui était dit comme étant la non stœchiométrie. Les écoles suédoise, australienne et américaine de cristallographie ont ici fait énormément pour faire progresser ces idées. Et comme [...] les phases lamellaires sur lesquelles je travaillais se prêtaient parfaitement à illustrer cela. Il était donc naturel que je me situe dans ce mouvement. » [I Dexpert, 2006, p. 2].

¹⁰⁹ « La microscopie à haute résolution permettait de 'voir' les défauts d'empilement au niveau des jonctions. La notion de phase était alors centrale, je me rappelle d'un colloque à Washington en 1972 où ce sujet fut âprement débattu. Les thermodynamiciens voulaient des frontières de phase. Des mesures thermodynamiques précises avaient été faites pour essayer de déterminer la nature des composés stœchiométriques. Mais la nouvelle microscopie montrait qu'il n'y avait pas de phase. » [I Caro, 2005, p. 4]. « Je dirais que le dernier grand congrès de chimie du solide a eu lieu en 1971 à Washington. » [I Galy, 2006, p. 25].

¹¹⁰ « Le groupe Collongues était plutôt sur les hautes températures, il connaissait bien son affaire sur les pyrochlores, les phases de haute température [...] pour ce qui me concerne c'était la non-stœchiométrie. Collongues n'était pas lancé là-dessus, c'était plus hautes températures, il y a eu des choses et je m'entendais bien avec des gens de chez lui. » [I Galy, 2006, p. 17, 29].

¹¹¹ « Mais ça existe toujours : je vois qu'il y a des gens qui font de petites non-stœchiométries d'oxygène, on n'y peut rien, mais je n'y crois pas » [I Galy, 2006, p. 5].

¹¹² Cette continuation de l'approche thermodynamique m'a été suggérée par l'un des anciens doctorants du laboratoire, qui se reconnaîtra sûrement et que je remercie.

c'est probablement aussi parce qu'ils ne l'ont pas vécu d'aussi près que les « structuristes », qu'il ne voit pas l'avènement de la microscopie électronique comme une révolution. Malgré son ralliement spectaculaire au camp adverse, Hyde, qui rédige la notice nécrologique de Anderson (JS) au début des années 1990, insiste sur la perte causée par un théoricien aussi talentueux que « JS ». Tout en rappelant l'opposition vive entre Anderson et Wadsley, Hyde appuie sur les tentatives faites par Anderson par la suite pour intégrer les micro-domaines à ses propres théories thermodynamiques.¹¹³ Il précise aussi que l'un des anciens élèves de Anderson s'appelle... J.G. Allpress !

Comment interpréter toutes ces relations quelque peu confuses ? Même si l'observation de micro-domaines par microscopie électronique ne supprime pas toute approche thermodynamique, elle relativise le concept de « phase » macroscopique. Ce faisant, la thermodynamique perd au cours des années 1970 et 1980 la prédominance durant l'après-guerre.¹¹⁴ Ce déclin se situe à la conjonction d'évolutions instrumentales (en particulier, la microscopie électronique) mais aussi chimiques : les « produits cinétiques », synthétisés à basse température, sont devenus plus intéressants que les « produits thermodynamiques » à haute température (VI.1.3).

Cette évolution a deux conséquences majeures pour la communauté de chimie du solide. Premièrement, les « diagrammes de phase » perdent de leur intérêt, semblent trop fastidieux pour le gain que l'on peut en espérer et sont de moins en moins étudiés à partir des années 1980. Ainsi des laboratoires comme celui de Flahaut à Paris – qui n'est plus associé au CNRS à partir de 1992 (IV.1.2) – ou de Cohen-Adad à Lyon passent du centre à la périphérie de la communauté.¹¹⁵ Ceci ne signifie pas pour autant que les diagrammes de phase disparaissent : leur importance se réduit comme peau de chagrin au sein de la communauté mais peuvent demeurer essentiels dans d'autres communautés sur des sujets comme les déchets radioactifs, les ciments...¹¹⁶

Réciproquement – c'est le deuxième point – la communauté de chimie du solide devient plus « structuriste ». Si la diffraction des rayons X a montré ses limites, l'analyse structurale en revanche sort renforcée. Le couplage entre diffraction X et microscopie électronique devient le *nec plus ultra* de la chimie du solide parce qu'il permet d'associer une moyenne globale (rayons X) à une vision locale (microscopie). Certains – Galy, Caro, Dexpert, Rouxel – considèrent l'introduction de la microscopie électronique dans le champ comme l'une des évolutions majeures des cinquante dernières années en chimie du solide.¹¹⁷

¹¹³ « Later, JS recorded that their two papers [Wadsley/Anderson] showed a convergence of views: in both cases the picture of a disordered, defect solid was that of short-range instead of a long-range order. In the following years, JS developed more elaborate statistical thermodynamic treatments of disorder and non stoichiometry [Rao, 1970, p. 29-105] [...] based on microdomain textures and Terrell Hill's "small systems" thermodynamics » [Hyde, 1993, p. 3].

¹¹⁴ « PT : Vous voulez dire que la thermodynamique est devenue inutile ? – PC : Non, ça a toujours un sens mais l'importance qu'elle avait au début de ma carrière [1955] et l'importance qu'elle n'a pas à la fin [1990], c'est à mon avis caractéristique. Il y a des disciplines – dont la thermodynamique – qui sont devenues moins utiles. » [I Caro, 2005, p. 16].

¹¹⁵ « Pour les caractérisations par exemple, la thermodynamique n'est plus leader, les diagrammes de phase se font beaucoup moins qu'avant. Les diagrammes de solubilité – ce que faisait Chrétien au départ – ne se font plus du tout, ou alors peut-être dans certains cas. » [I Caro, 2005, p. 16].

¹¹⁶ Cette idée m'a été suggérée deux fois, la première par Jean-Pierre Llored (doctorant en histoire des sciences), la deuxième par Paul Rigny (actuellement directeur de *L'Actualité chimique*).

¹¹⁷ « Pour moi et nombre de scientifiques, c'est [Wadsley] qui a vraiment fait le début de la chimie du solide avec les *microscopistes* à la fin des années soixante, avec la grande école de microscopie qu'il y avait à l'époque en Australie. C'est lui qui a véritablement lancé cette vision du solide parce qu'il a combiné ce que l'on déterminait en rayons X, ce qui est global sur le monocristal, avec les détails qu'amène la microscopie électronique. » [I Galy, 2006, p. 4]. « PT : *Qu'est-ce qui a marqué pour vous l'évolution de la chimie du solide au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle ?* – PC : Pour moi, si je ne devais retenir que deux éléments : je

Prenant acte de l'observation expérimentale de micro-domaines, Collongues forge l'expression « microscopiquement hétérogène » pour désigner le solide non stœchiométrique [Rouxel, 1997, p. 9] sans renoncer à l'approche thermodynamique [Collongues, 1979]. La communauté française des solidistes va donc peu à peu s'équiper en microscopes électroniques.

Parmi les laboratoires français de chimie du solide, c'est le LTR qui, le premier, eut recours à la microscopie électronique dès le début des années 1970. Sans doute faut-il y voir l'influence de la chimie métallurgique au LTR. Le CECM par exemple disposait de microscopie électronique pour ses études métalliques – Fayard devient un des spécialistes français de la microscopie électronique –. Durant les années 1970 et 1980, très peu de laboratoires de chimie du solide s'équipent en microscopie électronique. Les instruments reviennent chers à l'achat et à l'entretien et demandent un savoir-faire important, un personnel technicien qualifié. Il s'agit de se former aux microscopies électroniques à balayage (MEB) et en transmission (MET) pour observer les domaines nanoscopiques au sein des solides. Un technicien peut alors se spécialiser sur une technique.¹¹⁸ Quand ils ont des besoins ponctuels, les *solidistes* collaborent soit avec les chimistes qui en disposent comme les Bordelais venant à Bellevue puis travaillant avec une équipe espagnole (Miguel Alario Franco), soit ils s'associent aux physiciens comme Rousset à Lyon avec un laboratoire de l'Armée puis à Toulouse avec les physiciens des solides.¹¹⁹ Par la suite, Caen et Nantes franchissent le pas au cours des années 1980, Hagenmuller est très réticent à Bordeaux. La microscopie électronique permet de "voir" couramment des inhomogénéités de plus en plus petites : précision courante de 3Å dans les années 1970, 2Å pour les années 1980, entre 1,5 et 1Å aujourd'hui [CNRS, 1999, p. 11]. La chasse aux « défauts » est lancée.¹²⁰

Le laboratoire Raveau surtout tire son épingle du jeu en couplant de manière intelligente diffraction des rayons X et microscopie électronique, allant jusqu'à utiliser ce couplage comme un outil de synthèse. Il s'agit de repérer un défaut nanoscopique, c'est-à-dire un ordre tridimensionnel local, afin de synthétiser un solide macroscopique possédant cette structure locale. Après l'explosion des supraconducteurs* à haute température critique, c'est le laboratoire français qui monte le plus en puissance : bien soutenu, dirigé par un personnage dynamique, Raveau, secondé par une microscopiste de talent, Maryvonne Hervieu.¹²¹ En

dirais l'instrumentation avec la microscopie électronique à haute résolution [...] les instruments ne sont pas des presses-boutons mais savoir comment le signal est obtenu est extrêmement riche de sens. » [I Caro, 2005, p. 14].

¹¹⁸ « Je me suis formée à la microscopie électronique à transmission et à balayage avec lesquels je contrôlais la morphologie des particules. » [I Bonino, 2006, p. 1].

¹¹⁹ « C'était le début de la microscopie électronique à la fin des années soixante-dix, nous avons fait quelques caractérisations avec le groupe de Paul Caro en particulier Schiffmacher, ensuite, nous avons rencontré un collègue espagnol Miguel Alario Franco, qui était très dynamique et disposait d'un équipement sophistiqué de ME. » [I Pouchard, 2004, p. 20]. « Il n'y avait pas de microscopie électronique à l'époque au laboratoire et j'allais en faire dans un laboratoire du Service de Santé des Armées (CRESSA) à Lyon, qui m'ouvrait ses portes. Dans les années 1970, très peu de chimistes du solide faisaient de la microscopie électronique. Quand je suis arrivé à Toulouse, j'ai trouvé beaucoup de bons physiciens microscopistes, du bon matériel et j'ai pu faire tout de suite de la microscopie électronique. [...] Au Laboratoire de Physique des Solides, dirigé par le Professeur Fert. C'était un grand laboratoire toulousain à l'époque mais qui a disparu aujourd'hui Il y avait aussi le Laboratoire d'Optique Electronique (La Boule) mais qui était beaucoup moins ouvert et je n'y avais pas beaucoup accès. » [I Rousset, 2006, p. 13].

¹²⁰ « La microscopie électronique dont nous disposons permet d'atteindre une précision de 1,5 angstrœm, ce qui est extrêmement intéressant pour l'étude des défauts. » [I Ouvrard, 2006, p. 6]. « Il faut dire que certains laboratoires français ont été très tard à se mettre à la microscopie électronique. Les laboratoires comme Bordeaux ou Nantes l'ont connue très tard. Au contraire, il y a eu un certain nombre de laboratoires pionniers comme Toulouse ou Caen ou même nous mais réservé au problème des terres rares. » [I Caro, 2005, p. 5].

¹²¹ « Ce qui fait qu'aujourd'hui finalement je crois qu'en chimie du solide, c'est Caen qui domine tout ça parce qu'il y a eu cette combinaison rayons X – microscopie électronique au service des matériaux et après des

effet, ce sont des « cuprates » (Ba-La-Cu-O), non stœchiométriques, fabriqués à Caen que Bednorz et Müller reprennent et caractérisent pour mettre en évidence un effet supraconducteur jusqu'à 35K, ce qui pulvérise de plus de dix degrés la limite expérimentale atteinte jusque-là (23,2K avec Nb₃Ge en 1973) [Dahl, 1992] et la limite supérieure fixée par les physiciens théoriciens. Les chimistes français ont été mal avisés de croire les prédictions de leurs collègues théoriciens. De Gennes, Friedel ou Goodenough, comme d'autres, les avaient en effet convaincus que la température critique de supraconductivité ne pourrait pas dépasser des températures de l'ordre de 25K.¹²² La confiance en la physique théorique peut alors constituer un frein pour le chimiste du solide.¹²³

L'équipement progressif en microscopes électroniques des laboratoires de chimie a été rendu possible par un double mouvement entre l'université et les industriels. Des physiciens expérimentaux (comme le LOE dirigé par Gaston Dupouy à Toulouse) ont d'abord mis au point et fabriqué des prototypes de microscopes à partir des années 1930 pour étudier la matière. Dans un deuxième temps, séduite par leurs capacités et leurs précisions, l'industrie des matériaux a voulu utiliser ces instruments pour augmenter le contrôle de ses propres produits. Sous la pression de la demande, des fabricants d'instruments ont décidé de les commercialiser. Même si chaque type d'appareil était construit en quelques unités, voire dizaines d'unités seulement au cours des années 1970, 1980, les produire rapporte de l'argent. À la fin des années 1970, l'ordre de grandeur d'un microscope électronique approche le million de francs (soit environ 500000 euros 2006).¹²⁴ Les quelques clients ont d'abord été des industriels. Cette évolution a dopé le marché des instruments (microscopie) dont a pu finalement bénéficier la recherche universitaire. Dans un troisième temps, comme les appareils sont commercialisés, et que leur prix, quoique élevé, est à la portée de riches laboratoires, les universitaires (chimistes en autres) commencent à les acheter. Ainsi, si la demande est d'abord industrielle, les universitaires non spécialistes de la technique comme les solidistes, en profitent finalement. Le phénomène est similaire pour les autres instruments comme les spectroscopes.¹²⁵ À la fin des années 1990, le recours à la microscopie électronique reste une

mesures physiques. Aujourd'hui, c'est un jeune qui est le directeur du laboratoire, Antoine Maignan, très brillant, intéressant, une forte personnalité. » [I Galy, 2006, p. 29]. « Après l'explosion de la thématique supraconducteur à haute T_c, le laboratoire de Bernard Raveau a été très soutenu ; il a pu recruter des physiciens et Bernard Raveau s'est tourné largement vers la physique obtenant de très beaux résultats notamment en microscopie électronique. Depuis les dix dernières années c'est le laboratoire de chimie du solide français qui est le plus monté en puissance. » [I Pouchard, 2004, p. 29]. « La force de Caen a reposé sur la finesse d'investigation en microscopie électronique de Maryvonne et le punch extraordinaire de Bernard Raveau (comme rarement il y en a). » [I Pouchard, 2004b, p. 4].

¹²² « personne en chimie du solide en France ne s'intéressait à la supraconductivité. La raison était très simple : on nous avait dit – et j'avais discuté un certain nombre de fois avec John Goodenough en particulier mais des physiciens comme Friedel ou De Gennes le disaient aussi, qu'on avait fait le tour de la supraconductivité, qu'on ne dépasserait guère les vingt kelvins en température critique. » [I Pouchard, 2004b, p. 4]. « Quand j'ai commencé les matériaux organiques conducteurs, on m'a dit – on, c'est-à-dire les physiciens – que la théorie prévoit qu'on ne peut pas dépasser 25K pour la supraconductivité. Tout le monde le sait, je crois même que de Gennes était parmi ceux qui avaient montré que ce n'était pas possible. Quelque part, c'était un moteur pour expliquer qu'il fallait prendre les organiques, où semble-t-il la théorie ne prévoyait pas la même chose. En 1986, il y a eu la supra haute T_c avec Müller et Raveau » [I Moradpour, 2006, p. 13].

¹²³ « La physique a été totalement un frein, si on nous avait dit, c'est un challenge à relever, on serait partis et c'est sûr que nous aurions abouti que la supraconductivité à haute température aurait été découverte en France et pas ailleurs, dès les années 1975 peut être... » [I Pouchard, 2004b, p. 6].

¹²⁴ Une telle somme représente 1,6 fois le budget annuel (hors salaire) d'un laboratoire propre comme celui des terres rares (IV.2.2.2). Elle équivaut au budget d'un bon laboratoire de taille moyenne comme le Laboratoire des verres et céramiques en 2002 (chapitre VII) [RA LVC, 2002].

¹²⁵ « Les microscopes électroniques étaient quasiment des pièces uniques de toute façon parce que le nombre de clients était très réduit. – PT : C'est en terme de dizaines d'unités ? – PC : Oui et puis un nombre de fabricants réduit, japonais surtout, la dernière génération que j'ai connu vient d'un fabricant anglais. » puis « On a beaucoup profité du développement de l'instrumentation à cette époque-là, surtout venant de l'industrie et à la

nécessité pour les solidistes au niveau international, même si c'est une technique chère. En 1999, un rapport du CNRS [CNRS, 1999] fait l'état des lieux des laboratoires qui possèdent des microscopes électroniques. Parmi les chimistes du solide, on recense huit laboratoires possédant au moins un appareil : Amiens, Bordeaux (2), Caen, Le Mans, Lille, Nantes, Strasbourg.¹²⁶

VI.2.2. L'informatisation, un autre défi pour le chimiste

Parallèlement au développement instrumental des années 1960, l'informatique entre peu à peu dans la vie des chimistes. D'abord introduite pour réaliser des calculs et traiter les données expérimentales, elle s'insinue à l'interface entre l'expérimentateur et l'instrument, modifie progressivement le travail du laboratoire au cours des années 1970 avant d'ouvrir de nouveaux espaces de création par la modélisation durant les années 1990.

VI.2.2.1. Bureautique, organisation du laboratoire et publications

Pendant très longtemps, les doctorants ne tapent pas eux-mêmes leur thèse. Au cours des années 1960, 1970, c'est « la » secrétaire du laboratoire qui s'en occupe. Se pose un problème de duplication : comment sortir une quarantaine d'exemplaires de thèse sans la taper quarante fois ? Les laboratoires sont dotés d'ingénieux systèmes de polycopie « ronéo » (du nom de la compagnie qui l'a inventée dans les années vingt). L'original est d'abord tapé à la machine sur une feuille « stencil » dont le papier paraffiné se perforé à un endroit précis pour chaque lettre. On obtient ainsi une feuille perforée où le texte correspond à un ensemble de trous. En cas d'erreur de frappe, on cherche tant bien que mal à reboucher le trou en ayant de ne pas déchirer le stencil tout au long du processus. Enfin le stencil est "tiré à la ronéo" selon l'expression consacrée, c'est-à-dire qu'il est placé dans la machine à polycopier. Le système ressemble à une imprimerie mais en plus artisanal. De temps en temps, il faut rajouter de l'encre, les tirages ne sont pas toujours homogènes. Sortir une quarantaine d'exemplaires de thèse prend un jour et demi à deux jours de travail à temps plein, seulement pour le tirage.¹²⁷

demande de l'industrie : l'industrie avait besoin de contrôle ! – *PT* : *Le mouvement provenait de l'industrie surtout ?* – *PC* : Les industriels n'avaient pas fabriqué des spectrographes pour les beaux yeux des chercheurs. A la rigueur, ils pouvaient les fabriquer eux-mêmes et d'ailleurs, ce sont les chercheurs qui avaient fabriqué des instruments que les industriels avaient transformé en objets commerciaux qu'ils revendaient à leurs collègues. Il y avait vraiment une demande industrielle de contrôle. » [I Caro, 2005, p. 24].

¹²⁶ La date entre parenthèses indique l'âge de l'appareil le plus ancien (ce qui donne une indication sur une date maximum du début de l'équipement). Institut de physique et de chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS), dirigé par Carrière (1 MET depuis 6 ans, 1 MEB depuis 11 ans) ; LCTS, dirigé par Naslain (1 MET depuis 5 ans, 2 MEB depuis 11 ans) ; ICMCB, dirigé par Étourneau (1 MET et 1 MEB depuis 10 ans) ; CEMES, dirigé par Dexpert (5 MET depuis 8 ans, 1 MET) ; Laboratoire de structure et propriétés de l'état solide (LSPES) à Lille, dirigé par Farvacque (1 STEM depuis 9 ans, 2 MEB depuis 12 ans) ; CRISMAT à Caen, dirigé par Raveau et Allais (3 MET depuis 14 ans ; 4 MEB depuis 14 ans) ; Laboratoire des fluorures au Mans, dirigé par Leblanc (1 MET depuis 7 ans) ; IMN, dirigé par Batail (3 MET depuis 11 ans, 2 MEB depuis 9 ans) ; Laboratoire de réactivité et chimie de solide à Amiens, dirigé par Tarascon (1 MET depuis 13 ans, 1 STEM depuis 9 ans, 2 MEB depuis 18 ans). [CNRS, 1999, p. 56-65].

¹²⁷ « Vous aviez un carton avec une feuille spéciale, paraffinée, quand vous tapiez avec une machine à écrire sur cette feuille, elle était découpée à l'endroit de la lettre et ça faisait un petit trou. Quand vous vous trompiez, il fallait boucher le trou avec une résine rose, puis vous retapiez dessus une nouvelle lettre ou un nouveau mot mais parfois le stencil était abîmé et vous obteniez au tirage une tâche noire. C'était parfois catastrophique ! Il fallait ensuite bloquer le carton dans une machine, appelée ronéo ou ronéotypie un peu comme en imprimerie mais avec un système plus basique. Nous faisons ensuite nos tirages, on imprimait recto verso, on se trompait de

Une telle dépense d'énergie – rédaction à la machine et tirage à la ronéo – explique en partie la faible épaisseur des thèses de l'époque (souvent entre quarante et quatre-vingts pages). Le ronéotype impose aussi des restrictions typographiques (pas de caractères exotiques, d'exposants).

Au LCAES par exemple, le système ronéo est utilisé par Danièle Serreau jusqu'au début des années 1980. Une fois la thèse sortie de la polycopie, il s'agit de rassembler tous les membres du laboratoire pour que chacun colle les diverses photographies : spectres de rayons X, micrographie de surface, une à une sur les différents exemplaires de la thèse. Entre 1982 et 1984, le laboratoire achète un ordinateur avec un logiciel de traitement de texte : « Spellbinder », qui, quoique rudimentaire et peu maniable, permet d'écrire des formules mathématiques ou chimiques. Serreau continue de retranscrire les thèses des doctorants jusqu'en 1989 ! Avec l'arrivée des ordinateurs, le texte peut être imprimé grâce aux premières imprimantes à aiguille, lentes et bruyantes mais plus efficaces que la polycopie ronéo.¹²⁸ C'est à peu près à la même époque que les photocopieuses font leur apparition au laboratoire mais, si la ronéo était fastidieuse, elle donnait des copies de meilleure qualité que les premières photocopieuses.¹²⁹ À partir du milieu des années 1980, les étudiants tapent de plus en plus leurs rapports. En 1985, le LCAES achète un ordinateur « Apple 2E [...] pour piloter les manipulations » mais étudiants et chercheurs s'en servent bientôt pour taper leurs textes.¹³⁰ Asservissement instrumental et bureaucratie se développent de concert au sein des laboratoires. La popularisation des ordinateurs dans les laboratoires facilite la rédaction : le poids des thèses croît ainsi que les exigences administratives, les rapports d'activité sont de plus en plus volumineux, l'administration plus pesante. À partir du milieu des années 1990, les chercheurs sont de plus en plus distraits par les possibilités qu'offre Internet comme les « e-mails ».¹³¹

La multiplication des moyens de dupliquer les documents modifie le travail bibliographique des chercheurs. Durant les années soixante, le chercheur va consulter les

sens, tout était très artisanal et demandait beaucoup de temps. Pour sortir une thèse, je me rappelle que nous passions un jour et demi parfois deux jours à imprimer à partir des stencils. Cela explique le nombre de pages limitées des thèses dans les années 60 et 70. [...] Parfois, le papier se déchirait, passait de travers, ou alors les recto verso se trouvaient dans le mauvais sens. [...] Ah oui, il fallait rajouter de l'encre de temps en temps, lorsque l'impression devenait trop pâle. L'encre n'était évidemment pas homogène. » [I Serreau, 2004, p. 3].

¹²⁸ « Voici la liste des thésards dont j'ai tapé les thèses, avec l'année de soutenance. J'ai cessé de taper les thèses en 1989. Après ils se sont débrouillés. – PT : Avec l'ordinateur ? – DS : J'avais déjà un ordinateur. J'ai commencé à avoir un ordinateur autour de 1984 ou peut-être même 1982. C'était épique, j'avais un ordinateur type PC mais extrêmement éducatif, le logiciel s'appelait Spellbinder. Si vous vouliez, par exemple, enregistrer un texte avec un nom déjà employé, vous perdiez tout le texte : l'erreur était fatale (rires !). Disons que l'avantage de ce logiciel était que l'on pouvait avoir les indices et les exposants quasi-impossibles à obtenir à l'époque autrement et fort utiles en chimie. Nous avions aussi une imprimante à aiguilles qui faisait un bruit épouvantable quand on imprimait les thèses. On avait l'impression d'avoir un avion qui décollait quand elle fonctionnait, ça a été nos débuts de l'utilisation des ordinateurs. Mais bon enfin on était contents. Ça marchait, c'était mieux que les stencils. » [I Serreau, 2004, p. 2-3].

¹²⁹ « Par contre j'ai oublié l'arrivée des premières photocopieuses, c'est ancien aussi, peut-être même plus ancien que les ordinateurs, quand c'est arrivé, parce qu'au début tout se faisait manuscrit. – PT : Dans les années soixante-dix ? – DS : Oui peut-être bien. Au début, c'était des systèmes assez lourds, on utilisait une feuille traitée type papier photo un peu plus mince comme pour les photos polaroids. Les copies vieillissaient mal, nous n'obtenions pas des documents de qualité. » [I Serreau, 2004, p. 3].

¹³⁰ « En 1985, on a dû avoir un Apple 2E, qui était un des premiers ordinateurs pour piloter les manipulations. Il y avait deux polices de caractère en tout et pour tout, on faisait des posters avec ça, on était fou de joie. Le premier de mes étudiants qui a tapé son rapport à l'Apple 2E - c'était immonde- mais il était fou de joie. C'était vraiment un progrès considérable. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 11]

¹³¹ « Pour les inconvénients, je pense que l'informatique est un bon moyen de perdre du temps : on nous demande de plus en plus de rapports sous prétexte que c'est plus rapide maintenant, on reçoit beaucoup de e-mails inutiles » [I Pouchard, 2006, p. 32].

articles à la « bibliothèque centrale du CNRS » (s'il est en région parisienne), les lit soigneusement puis doit prendre des notes, consciencieusement. La tendance s'inverse par la suite. Au cours des années 1980, le chercheur continue à aller en bibliothèque mais peut déjà commencer à photocopier les articles qui l'intéressent. Avec l'avènement d'Internet, il ne se déplace plus de son bureau et « aujourd'hui, on imprime beaucoup plus que ce que l'on pourra lire. » Comme il devient extrêmement facile de reproduire sur papier, on accumule, ce qui a tendance à réduire les « discriminations entre ce qui est important et ce qui ne l'est pas ». ¹³² Cet accès plus grand à l'information, rendu possible par l'informatisation, a deux conséquences majeures sur la façon de faire de la science : on ne peut plus ignorer les publications de ses concurrents directs, et paradoxalement, on sait moins ce que font les autres. Je m'explique. Jusqu'aux années 1960, les auteurs prennent souvent des pincettes pour affirmer leur primauté dans un domaine particulier. Par exemple, avant les années soixante, les textes regorgent de précautions du genre « il semble que » personne n'ait travaillé sur tel ou tel point. ¹³³ La difficulté pour se procurer publications ou références bibliographiques peut justifier – en partie seulement – l'oubli de certains scientifiques ou certaines nations à citer leurs concurrents. ¹³⁴ Et en effet, les ressources bibliographiques sont limitées : bibliothèques au départ ; puis, par la suite, les *Current Contents*, publications papier, hebdomadaires, qui détaillent domaine par domaine les nouvelles parutions, ainsi que les *Chemical Abstracts* permettant de chercher des références répertoriées de manière assez large. Ces revues bibliographiques papier constituent elles-mêmes une conséquence de la duplication plus facile de l'information. Bientôt, autour de 2000, elles sont rendues obsolètes par les moteurs de recherche que les revues proposent « en ligne ». ¹³⁵ Ainsi, il devient relativement facile de faire une recherche bibliographique sur un sujet précis même si le nombre de revues a drastiquement augmenté (III.3.1.2). La contrepartie de cette spécialisation par « mots-clés », qui permet de balayer efficacement les références cherchées, est un renforcement de la myopie vis-à-vis des domaines adjacents. Ainsi, à la lecture matérielle d'une revue papier, le chercheur pouvait tomber par hasard sur un article assez éloigné de son sujet mais qu'il pouvait trouver intéressant pour ses recherches. Le principe des mots-clés, en voulant systématiser à l'extrême, laisse évidemment passer ce genre de rencontres que le hasard ménageait aux lecteurs attentifs. ¹³⁶ La multiplication des revues disponibles provoque aussi

¹³² « J'essaie aussi d'expliquer ce que c'était que faire de la science quand il n'y avait pas de photocopies. À mon époque, au début, on se procurait les publications à la bibliothèque centrale du CNRS, on y allait, on lisait l'article, on prenait des notes, et on le rendait. J'ai encore des fiches, c'était affreux, infernal à classer, à garder. D'un autre côté, quand vous avez écrit quelque chose sur le papier, vous le retenez. Aujourd'hui, on imprime beaucoup plus que ce que l'on pourra lire. On sait ce qui existe mais il y a moins de discriminations entre ce qui est important et ce qui ne l'est pas. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 12]

¹³³ « Il semble cependant que le calcium, malgré sa faible densité (1,6) n'ait pas, à ce point de vue, retenu l'attention des chercheurs. » [Pâris, 1934, p. 1]. « Le comportement des composés graphite-métaux alcalins vis-à-vis des halogènes ne semble pas avoir été étudié jusqu'ici. » [Diebold & Hérol, 1961].

¹³⁴ « L'accès à l'information est désormais plus facile. On a souvent reproché aux Russes de ne pas citer, c'est peut-être aussi parce qu'ils avaient moins accès que nous à l'information. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 12]

¹³⁵ « Le CNRS a longtemps été pour nous la seule source des revues que l'on pouvait se procurer, en dehors de celles auxquelles nous étions abonnés. Ensuite, il y a eu ce que l'on appelle des *Current Contents*, qui permettaient de connaître chaque semaine les nouveaux articles parus sur un sujet nous concernant, on les demandait alors à l'auteur. Il y avait aussi les *Chemical Abstracts*. Enfin, aujourd'hui, on utilise des revues en ligne, via les moteurs de recherche des éditeurs, comme *Elsevier* ou *American Institute of Physics*. Le laboratoire est abonné à *Science Direct* sur lequel on peut rechercher des mots-clé ou des noms d'auteurs. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 16].

¹³⁶ « PT : *Qu'est-ce que vous pensez de l'évolution des publications au cours de votre carrière ?* – JG : À l'époque, le gros avantage était qu'il y avait un nombre limité de journaux, qu'il n'y avait pas l'information sur l'ordinateur, par conséquent quand on regardait un journal, *Inorganic Chemistry*, *Journal of Solid State Chemistry*, on était obligé de lire la table des matières, et même comme on avait le livre entre les mains, on feuilletait, et donc on regardait des papiers qui n'avaient rien à voir avec celui qui nous intéressait, pour celui qui

une surenchère éditrice qui participe de l'inflation du nombre de publications au cours des cinquante dernières années : non seulement multiplication du nombre de chercheurs mais encore multiplication du nombre de publications par chercheur. À force de publier sans cesse, les chercheurs sont moins attentifs à ce qu'ils publient et certains regrettent une dérive qui s'accompagne d'une diminution des exigences en matière de rigueur scientifique.¹³⁷

VI.2.2.2. À l'interface numérique/analogique

La diffraction des rayons X (chapitre IV) et la spectroscopie (IV.2) constituent deux techniques qui se sont perfectionnées grâce à l'évolution des moyens de calcul. Elles rendent compte d'une évolution plus générale en sciences : l'informatisation des instruments. À partir du milieu des années 1960, les premiers ordinateurs pénètrent dans les laboratoires de chimie du solide pour faciliter les calculs cristallographiques. Ils remplacent alors « table de logarithme », « règle à calcul » et machines à main peu performantes pour effectuer des transformées de Fourier. Symptomatiquement, les premiers à s'intéresser à l'informatique sont les doctorants, et parmi eux, plutôt les cristallographes – plus liés à la diffraction des rayons X –.¹³⁸ Des cours de programmation commencent justement à être dispensés à l'université : ainsi, lorsqu'en 1967, un cours de Fortran est proposé à la Halle aux vins à Paris, quelques étudiants s'y précipitent sous l'œil incrédule du professeur.¹³⁹ On utilise des cartes vierges couvertes de chiffres (image fournie en annexe A.VI.2) que l'on perfore en divers endroits pour décrire une opération à exécuter. Chaque carte porte une seule opération numérique. Un programme comporte donc plusieurs milliers de cartes. Le travail est fastidieux : vingt-quatre heures de calcul effectif pour une seule structure, sans compter le temps de préparation pour la programmation, le coût de l'heure de calcul, le transport. Parce que, si le laboratoire ne dispose pas d'ordinateur ou que l'ordinateur n'est pas assez rapide, les chimistes se rendent dans des centres de calcul spécialisés à la faculté des sciences d'Orsay, au CEA de Saclay, au centre CNRS de Bellevue... C'est l'époque où les universités les plus riches peuvent acheter des calculateurs puissants et les mettre à disposition de leurs différents laboratoires.¹⁴⁰ Le service est payant. Comme chaque calcul prend du temps et de l'argent, on

était un peu curieux. Tout en n'étant intéressé que par les oxydes, j'ai vu des structures de sulfures, des minéraux, des tas de choses comme ça ou même des oxydes qui ne rentraient pas dans mes préoccupations. Alors que maintenant, on clique sur la publication qui nous intéresse, je pense qu'on est noyé dans un maelström de publications, il y en a trop, il y en a beaucoup de médiocres, si elles ne sont pas totalement fausses. » [I Galy, 2006, p. 25].

¹³⁷ À propos des publications : « il y en a beaucoup de médiocres, si elles ne sont pas totalement fausses. » [I Galy, 2006, p. 25].

¹³⁸ « j'ai été le premier informaticien, si l'on peut dire, du laboratoire mais informaticien entre guillemets. J'ai été obligé de faire les premiers programmes pour les calculs de cristallographie parce qu'il n'y avait rien, c'était un peu dur de faire des transformées de Fourier sur des machines Olivetti à main. – PT : C'était à quelle époque ce premier ordinateur ? – JG : Il est arrivé en 1964 : 8k de mémoire centrale plus 8k supplémentaires. » [I Galy, 2006, p. 2] « En cristallographie, il y a beaucoup de calculs. Avant, il y avait beaucoup de choses qui étaient quasiment infaisables, je suis de la génération "table de logarithmes, règle à calcul". [...] On a été les premiers dans le laboratoire Collongues à s'initier à l'informatique. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 11]

¹³⁹ « En 1967, pendant ma thèse, avec un de mes collègues qui était de la même promotion que moi et qui faisait sa thèse au même endroit, Daniel Michel, nous sommes allés voir R. Collongues, pour lui demander de suivre les cours de Fortran à la Halle aux vins qui est devenue Jussieu. C'était le premier cours de Fortran, c'est-à-dire le langage informatique de l'époque. Il nous a regardé comme des bêtes curieuses, mais comme il était intelligent, même s'il ne l'avait pas senti lui-même, il a dit "pourquoi pas ?". On a eu le droit d'aller suivre les cours de Fortran tous les jeudis après-midi. On a été les premiers dans le laboratoire Collongues à s'initier à l'informatique. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 11].

¹⁴⁰ « PT : Au niveau de l'informatique, pouvez-vous en raconter les débuts ? – GO : Lors de ma première publication avec Brec [1973], je devais déterminer la structure de phases hexagonales, on utilisait la « méthode

essaie d'évaluer sa pertinence avant, on y réfléchit longuement. Mais au final, les ordinateurs permettent de résoudre des structures cristallines qui, sans cela, seraient demeurées inconnues.¹⁴¹ On passe ainsi des semaines entières à faire tourner des calculateurs grands comme des appartements pour déterminer une structure cristalline qui, aujourd'hui, demanderait avec un ordinateur portable de quelques minutes à quelques heures seulement !¹⁴² La puissance de l'ordinateur n'est pas le seul critère qui détermine la vitesse de l'opération : la méthode de calcul aussi est importante. Au début des années 1970, il s'agit de trouver un bon compromis entre une méthode rigoureuse mais lourde (« moindres carrés ») et une méthode plus rapide mais moins précise.

En 1969, le rapport de conjoncture de la section chimie minérale incite les chimistes à utiliser le « calcul automatique », soit pour des calculs de liaison chimique, soit pour des opérations de « commande automatique » des instruments [RC CNRS, 1969, p. 13]. Cinq ans plus tard, les recommandations du rapport sont beaucoup plus insistantes : « Un puissant équipement en calcul électronique est indispensable pour le développement des études du solide et des surfaces. » [RC CNRS, 1974, p. 82] Il s'agit de traiter les données expérimentales (cristallographie, thermodynamique) par des programmes de calcul mais aussi de les enregistrer en reliant les moyens de calcul aux appareils proprement dits, ce qui augmente aussi la précision. Durant les années 1960 par exemple, lorsque la diffraction des rayons X est associée à des plaques photographiques, c'est au chercheur de mesurer l'intensité de chaque tache – il y en a plusieurs milliers – afin de reconstituer le spectre. Par la suite, le couplage entre les rayons X et des capteurs électroniques par l'intermédiaire des ordinateurs permet un gain de temps substantiel.¹⁴³ Ces injonctions conduisent à un « accroissement considérable du

de Tulli » pour obtenir un affinement graphique du rapport c/a et le comparer aux distances expérimentales. C'était ainsi qu'on optimisait les paramètres au laboratoire, la publication avait été soumise et acceptée par *Inorganic chemistry* mais le *referee* nous avait suggéré un affinement avec la « méthode des moindres carrés » qui nécessitait un calcul plus lourd. Or, au début des années 1970, la faculté de Nantes avait acheté un ordinateur IBM 1130, qui occupait un très gros en volume pour de petites performances. Nous l'avions utilisé pour ce calcul : il s'agissait de perforer des paquets de cartes puis de les introduire dans l'ordinateur et de lancer le calcul pour une nuit. Ensuite, il y a eu une Olivetti au laboratoire pour l'affinement. » [I Ouvrard, 2006, p. 4].

¹⁴¹ « Avant de se lancer dans un calcul, on réfléchissait énormément pour savoir si c'était utile ou pas. Si jamais, le calcul ne marchait pas, on réfléchissait encore plus longtemps pour savoir où était l'erreur et comment on allait s'y prendre pour que ça marche. Même quand il y a eu les débuts de l'informatique, pour calculer une structure en cristallographie, il fallait deux mille cartes. La première machine à calculer, elle ressemblait à celle de votre épicier. J'allais à Orsay avec mes deux mille cartes sous le bras. Il y avait une instruction par carte. Quelqu'un programait la machine pour nous. Dans le lecteur qui lisait les cartes, elles pouvaient se déchirer, et alors il fallait tout recommencer. Quand tout marchait bien, le calcul prenait vingt-quatre heures. Quand, au bout de vingt-quatre heures, vous récupérez votre calcul et qu'il y avait une faute (oubli d'une séparation, d'une virgule par exemple), vous n'obteniez rien à cause d'une virgule oubliée. Quand ça vous arrive deux fois, la troisième fois, vous faites attention. [...] En plus, c'était payant quand on lançait un calcul à Orsay. Il ne fallait pas lancer trois fois des calculs qui coûtaient de l'argent au laboratoire. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 11]. « On avait des bandes papier perforées qui se cassaient, c'était intéressant mais ça m'a obligé à travailler jour et nuit. » [I Galy, 2006, p. 2]. « Au début, on faisait les matrices à la main mais les calculs se faisaient avec de grosses machines, des ordinateurs énormes, "Palace", qui étaient dans un service commun pour tous les laboratoires de Bellevue puis ensuite on est allé à Orsay, à la faculté, où il y avait un centre de calculs avec des machines plus puissantes. On payait l'accès. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 2].

¹⁴² « Pour vous donner une idée, pendant ma thèse, j'ai passé tout le mois d'août 1964, à Saclay, dans une salle climatisée grande comme cet appartement sur un ordinateur avec des bandes perforées pour établir la structure d'un composé que je ferais aujourd'hui en trois heures sur un portable » [I Tournoux, 2006, p. 16]

¹⁴³ « Il fallait auparavant exploiter le spectre de diffraction : il était obtenu à l'époque avec des méthodes photographiques, on mesurait l'intensité de chaque tache au micro-densitomètre, il fallait mesurer deux ou trois mille taches » [I Tournoux, 2006, p. 16]. « En vue de reproduire les spectres obtenus et pour faciliter la comparaison des degrés de cristallisation de nos produits, nous avons enregistré les spectres de diffraction X à l'aide d'un spectrophotomètre Siemens type A. Pour les clichés de diffraction électronique nous avons utilisé un microphotomètre Hilger type L 456/9 qui était mieux adapté à ces clichés que l'appareil précédent. » [Rousset, 1969].

nombre d'heures de calcul » [RC CNRS, 1974, p. 83]. Le gain de temps s'opère aussi par la constitution de bases de données, qui permettent de comparer les valeurs tabulées aux valeurs expérimentales. L'enregistrement puis le traitement des données par voie numérique facilite sans conteste le travail du chimiste.¹⁴⁴ Les années 1970 voient l'informatique pénétrer les laboratoires de chimie, soit au sens propre, soit par le recours aux centres de calcul. Elles correspondent à une modification profonde du travail des cristallogues. La plupart des évolutions instrumentales majeures – RMN, RPE, microscopie électronique, spectroscopie (VI.2.1) – sont rendues possibles par la popularisation simultanée des capacités de calcul.¹⁴⁵ Au sein des laboratoires de chimie du solide, les physico-chimistes viennent se placer à l'interface entre instruments, informatique et théories (IV.2). L'acronyme « EXAFS » (*Extended Absorption Fine Structure*) par exemple désigne à la fois une méthode expérimentale basée sur l'absorption de rayons X émis par un synchrotron et la théorie indispensable à l'interprétation des résultats expérimentaux.¹⁴⁶

VI.2.2.3. Modélisations : vers une chimie prédictive ?

Les ordinateurs induisent une troisième évolution remarquable au sein des laboratoires en rendant possible la « modélisation ». D'abord réservée aux physiciens travaillant sur des composés modèles (les plus simples possibles), la modélisation commence à intéresser les chimistes à partir du moment où la « puissance des ordinateurs » disponible est suffisante pour affronter la complexité des solides réels. Les premières tentatives datent des années 1980 pour les *solidistes* français qui désirent alors « connecter » la théorie et l'expérience grâce aux calculateurs électroniques.¹⁴⁷ Le plus souvent, les chimistes utilisent les modélisations mises en place par les théoriciens mais les appliquent sur des composés solides originaux (qu'ils ont eux-mêmes fabriqués). En chimie, la simulation tente de lier la paillasse aux propriétés physiques selon trois modalités.

À partir des années 1980 et plus encore 1990, les chimistes commencent par modéliser les propriétés physiques de leurs propres composés : « propriétés paramagnétiques des

¹⁴⁴ « L'informatique a permis le développement et le perfectionnement de tous les instruments de la physique, tous les outils de caractérisation que nous utilisons. Les méthodes de caractérisation ont gagné en puissance, en précision. Au niveau du traitement des données par exemple, le gain est formidable. » [I Pouchard, 2004, p. 32].

¹⁴⁵ « toutes les technologies nouvelles d'investigations qui sont apparues sont associées à un corpus mathématique qui ne peut être traité que par ordinateur, que ce soit la RMN, la spectroscopie ou autre chose. » [I Caro, 2005, p. 21].

¹⁴⁶ « l'EXAFS [...] donnait l'environnement autour d'un élément donné » [I Galy, 2006, p. 13]. « Aujourd'hui, on a d'autres méthodes, l'EXAFS par exemple, mais ce sont des rayons X aussi : c'est le synchrotron. Ces nouvelles méthodes permettent de faire à peu près la même chose : en fait les rayons X ont des longueurs d'onde bien particulières alors qu'avec le synchrotron, vous avez accès à toutes les longueurs d'onde. Pour faire simple, c'est ce qu'on peut dire. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 8]. « C'est très rapidement, dans les années 1975, qu'une théorie valide a été mise sur pied par des Américains. La spectroscopie d'absorption X consiste à arracher un électron d'une orbitale, à l'envoyer dans les photons qui arrivent sur le matériau dans l'environnement de l'atome auquel il a été arraché. Entre l'onde émise et l'onde rétro-diffusée par les voisins de cet atome que vous avez choisi comme indicateur si vous voulez, se crée une interférence dont une théorie a parfaitement expliqué le pourquoi. – PT : *C'est quelle théorie ?* – HD : C'est l'EXAFS, la théorie et l'expérience portent le même nom, spectroscopie d'absorption X. Ensuite, il y a tout un tas de finesses, parcours simples, multiples,... et c'est encore en train de se développer, la marge de progression est fantastique ! » [I Dexpert, 2006, p. 6].

¹⁴⁷ « La simulation est une grande technique que l'ordinateur rend aujourd'hui possible et qui permet de connecter la théorie et l'expérience. – PT : *A quel moment êtes-vous venus à la simulation ?* – PC : Durant les années 1980, ça a suivi la puissance des ordinateurs. A partir du moment où on a eu des ordinateurs plus puissants, on a pu simuler pas mal de choses. » [I Caro, 2005, p. 8]. « il y a environ vingt ans que nous faisons des modélisations au laboratoire. » [I Ouvrard, 2006, p. 7]. « la modélisation a quand même énormément progressé, surtout ces dix dernières années. » [I Dexpert, 2006, p. 6].

lanthanides » pour l'équipe Caro,¹⁴⁸ « conductivité ionique » des oxydes des éléments de transition pour l'équipe Pouchard... Comme ils empruntent les méthodes de calcul aux théoriciens, la modélisation constitue un nouveau nœud de rencontre entre physiciens et chimistes. Modéliser les propriétés physiques devient une nouvelle activité du chimiste surtout à partir des années 1990. Il arrive aussi que certains – tel Goodenough – maîtrisent suffisamment la théorie des bandes qu'ils en ont développé une connaissance intuitive, qui leur permet de faire de bonnes approximations (pour simplifier les calculs) sur un cas complexe et de mettre en évidence le sens physique du modèle sur le solide réel.¹⁴⁹

Deuxièmement, le chimiste se lance dans la cartographie spatiale des électrons – densité électronique – afin de décrire la liaison chimique. S'il dispose de suffisamment de données thermodynamiques, il peut essayer de modéliser les interactions au sein d'un oxyde simple en effectuant des calculs *ab initio* par la méthode DFT (TDF en français : théorie densité fonctionnelle). Souvent, la complexité des composés réels et le manque de données quantitatives réduisent les possibilités de modélisation.¹⁵⁰ Parfois, au contraire, on peut relier les « distributions électroniques » calculées aux phénomènes observables comme les transitions métal-isolant.¹⁵¹ Cette corrélation entre structure électronique et propriétés physiques constitue un nouvel avatar de la relation structure-propriétés (III.2.2). Dans le cas des solides exotiques – très éloignés des cristaux tridimensionnels –, la modélisation est souvent difficile à mettre en œuvre. Pour les verres de chalcogénure par exemple (VII.2), les chimistes rennais soit travaillent avec des « orbitales atomiques » (comme avec une molécule de quelques atomes), soit ont recours à des « modèles empiriques ».¹⁵² Mais, à l'opposé, un domaine d'actualité comme les « solides poreux » [Férey, 2007] ne peut plus faire l'économie de la modélisation. Les solides poreux sont des solides creux, comportant des cavités (ou cages) vides de plusieurs nanomètres de diamètre. Ces solides hybrides, hétérogènes, aux

¹⁴⁸ « Nous avons fait partie de cette aventure où à un moment donné, on est passé de l'expérience à la théorie et puis à la simulation des propriétés physiques, qui est maintenant une technologie extrêmement importante de la science. [...] Nous, notre grande affaire, c'était la simulation des propriétés paramagnétiques des lanthanides dans les solides. » [I Caro, 2005, p. 8].

¹⁴⁹ « je ne sais pas si on peut vraiment faire de la chimie prédictive. Je pense qu'on peut, on doit aller vers le prédictif à travers des travaux de calculs de structure de bande, on sait maintenant un peu mieux... mais je vois très souvent des gens – je parle de John Goodenough notamment – qui, par l'intuition, sans faire de calculs *ab initio* avec des gros ordinateurs ont prévu beaucoup de structures de bande de manière qualitative, et qui n'ont pas été remis en cause. » [I Étourneau, 2005, p. 8].

¹⁵⁰ « lorsqu'on connaît les éléments de base en énergies, en thermodynamique, qui caractérisent le solide, on peut essayer de prédire comment vont se faire les interactions. Dans certains cas, par exemple la fameuse TDF, la théorie densité fonctionnelle, on arrive à déboguer pas mal de questions avant même de faire une manip. Ceci n'a pu se développer qu'avec la montée en puissance des ordinateurs parce que simuler le comportement de dix, quinze, vingt atomes prend du temps. – PT : *On arrive à simuler le comportement de combien d'atomes ?* – HD : En chimie organique, ça va assez loin puisqu'on simule le comportement de ces grosses molécules, voire en biologie. Dans le solide, on pourrait le faire aussi mais on manque de données sur la liaison chimique : vous prenez une liaison Fe-O, comment vous la caractérisez du point de vue de l'échange énergétique ? On crée ses propres bases de données à partir des observations » [I Dexpert, 2006, p. 6].

¹⁵¹ « Depuis une dizaine d'années, nous avons développé des techniques de modélisation en empruntant les méthodes des physiciens. Nous menons par exemple des calculs *ab initio* par la méthode dite de la DFT (fonctionnelle de la densité) pour modéliser des distributions électroniques dans les solides (structures de bande), la conductivité ionique. Comme les calculateurs sont de plus en plus puissants, nous pouvons augmenter la taille des systèmes atomiques concernés. » [I Pouchard, 2004, p. 32].

¹⁵² « On a fait de la modélisation vers 1990, de la dynamique moléculaire avec Austen Angel [...]. – PT : *Quelles théories avez-vous utilisées, la théorie des bandes, des groupes ?* – JL : On a fait de la chimie avec les mains, on utilisait des orbitales moléculaires simples. Nous n'utilisons pas les modèles trop compliqués des physiciens. Je pense que ce serait prétentieux parce qu'on manipule des solides trop compliqués pour se donner l'illusion qu'on est des grands savants théoriciens. » [I Lucas, 2005, p. 19]. On a des modèles un peu empiriques. Avec les moyens de calcul, on peut effectivement modéliser des structures simples et des propriétés. » [I Adam, 2006, p. 8].

grandes surfaces de contact « spécifique » (la surface creux/solides pouvant être de l'ordre de plusieurs milliers de mètres carrés par gramme, soit un ordre de grandeur supérieur aux zéolithes) ont des structures tridimensionnelles si complexes, que leur représentation nécessite le recours aux images de synthèse (sauf si on peut obtenir des monocristaux).¹⁵³ Comme en microscopie électronique (VI.2.1.2), ces images à partir de résultats expérimentaux et de simulations numériques. Ceci pose de nombreuses questions quant à la signification de ces images : quel degré de confiance, quel mode de vérification, quelle véracité, quel sens, quelle utilité mais aussi quel rôle social ? Le chimiste y voit-il la « réalité » ? Il semble que le chimiste se contente d'une vérification par induction : si, en testant le modèle (fabriquant les images de synthèse) sur un grand nombre de composés dont la structure est connue (par diffraction de rayons X), l'accord est correct, alors on pense qu'il doit être correct pour d'autres composés (dont la structure n'est pas connue).¹⁵⁴

Troisièmement, le projet le plus ambitieux consiste à utiliser la modélisation pour « rationaliser » la synthèse : il s'agit ni plus ni moins d'entrer des critères dans l'ordinateur (structure, propriétés), de faire tourner la machine puis d'obtenir le produit correspondant au cahier des charges initial. Les avis sont partagés sur la question. Les cristallogues des solides traditionnels (cristallins), qui fréquentent la paillasse de manière assidue, ne croient pas que les possibilités actuelles permettent que la synthèse virtuelle donne des résultats effectifs. Selon eux, les solides définis par l'ordinateur ne correspondent jamais à ceux que trouve le chimiste au fond du creuset après la réaction chimique.¹⁵⁵ Les choses pourraient changer dans l'avenir mais le « hasard » fait toujours partie de la synthèse chimique. Même à l'heure d'une puissance de calcul démultipliée, la « prédiction » complète d'un bout à l'autre de la chaîne numérique reste une utopie.¹⁵⁶ Aujourd'hui, seule la prédiction par analogie fonctionne plutôt bien. Certains domaines comme les « médicaments » sont plus adaptés à la modélisation même si les résultats sont souvent loin d'être probants. Il demeure alors plus efficace, rapide et moins cher pour le chimiste de commencer et de finir à la paillasse.¹⁵⁷

¹⁵³ Le numéro de janvier 2007 de l'*Actualité chimique* propose un dossier sur « les nouveaux solides poreux », qui renferme des dizaines d'images artificielles représentant de belles structures tridimensionnelles colorées. Férey écrit : « Seule la combinaison de la chimie maîtrisée et l'utilisation de notre programme de simulation structurale a permis d'accéder à [la] structure [des *Metal-Organic Frameworks*] car, en l'absence de monocristaux, les performances de la diffraction de poudres ne sont pas suffisantes pour accéder à de tels volumes (volume maximum exploitable : 288 000 Å³). » [Férey, 2007, p. IX]

¹⁵⁴ « Cette méthode, baptisée AASBU (« *Automated Assembly of Secondary Building Units* » [2000]), est actuellement unique par la rapidité de ses calculs de simulation numérique. Sa validité a été prouvée en retrouvant entre autres de nombreuses structures connues. Basée sur une méthode de Monte-Carlo avec recuit simulé, elle vise dans son principe à recenser *toutes* les possibilités de connexion entre les [briques élémentaires] et à créer ainsi une bibliothèque virtuelle de structures possibles dont les probabilités d'existence sont classées en terme d'énergie de réseau, la structure la plus probable ayant celle de plus basse énergie. » [Férey, 2007, p. VII].

¹⁵⁵ « J'ai toujours entendu certains qui disaient : "à partir de quelques mesures physiques, je vais pouvoir créer des matériaux" mais ça n'a pas abouti, parfois on crée des matériaux sur des visions de cristallographie, on va faire des *intergrowths* ou des choses comme ça. La théorie qui permettrait d'élaborer des matériaux en ne faisant que de la théorie n'existe pas. Pour l'instant, la théorie essaye de modéliser des choses qui existent, je crois qu'on en est encore là. À l'heure actuelle, si j'envisage de fabriquer un composé nouveau, je pense qu'il est plus rapide que j'aille à la paillasse plutôt que de lancer quelqu'un à faire des calculs, je verrai si ça marche ou pas. Ça va venir peut-être, les théories s'affinent avec le temps, on maîtrise de plus en plus de paramètres. » [I Galy, 2006, p. 23].

¹⁵⁶ « GO : Le hasard ! Je crois peu à la chimie complètement prédictive. La prédiction est possible par analogie mais pas plus. » [I Ouvrard, 2006, p. 5]. « PT : *Avez-vous des retours grâce à la théorie ?* – JL : Honnêtement, on n'a jamais de retour : ça n'aide pas à valoriser notre synthèse. » [I Lucas, 2005, p. 19].

¹⁵⁷ « Il y a des domaines où la théorie s'applique davantage, par exemple pour les médicaments. J'ai vu dans une grosse boîte utiliser des théories comme la mécanique moléculaire pour faire le design d'un composé pharmaceutique, ils sont passés par la théorie pour définir la structure de ce composé, ils ont mouliné d'énormes programmes, on avait quasiment sa dimension. Finalement, on a eu le produit, mis en solution, on l'a laissé s'évaporer pour former le cristal puis on a fait la structure. Ça a pris moins de temps et moins d'argent. Pas une

Fabriquer un solide avec des propriétés définies à l'avance (et conformes aux prévisions) relève encore de l'illusion. La mise en équation et le calcul numérique n'égalent pas les performances du cerveau humain et la complexité de ses modes de raisonnement. Une bonne connaissance du tableau périodique constitue déjà une excellente modélisation, qui, alliée à une bibliographie intelligente, permet de synthétiser un composé solide intéressant.¹⁵⁸ La meilleure modélisation d'une réaction chimique n'est-elle pas encore la réaction chimique elle-même ?¹⁵⁹ La question reste controversée à l'heure actuelle parmi les scientifiques. Quoiqu'il en soit les chimistes se tournent de plus en plus vers la modélisation pour améliorer leurs synthèses chimiques.¹⁶⁰ Certains solides s'y prêtent plus volontiers que d'autres : dès le début des années 1990, on a modélisé la fabrication de solides poreux pour « prédire une structure nouvelle ». ¹⁶¹ D'autre part, la modélisation des étapes d'une réaction chimique (sol-gel), d'un milieu réactionnel (industrie) ou d'un bain fondu (méthode Czochralski) permet de contrôler et d'améliorer les procédés de fabrication.

VI.2.3. Perte de repères identitaires en chimie ou renouveau générationnel ?

Que ce soit pour les publications, le rapport tactile à l'instrument ou la représentation de la matière, l'informatique a bousculé les pratiques de laboratoire après-guerre. À partir des années soixante pour la cristallographie, soixante-dix pour la spectroscopie, quatre-vingt pour la bureautique, quatre-vingt-dix pour la modélisation, le chimiste a modifié ses méthodes de travail face à l'informatique en évolution.

L'interaction chimie/informatique met en évidence un double processus : volonté d'acculturation d'un côté et méfiance vis-à-vis de la modernité de l'autre. Chaque individu vit cette évolution selon une approche personnelle mais aussi sa position professionnelle (technicien, physico-chimiste, cristalochimiste), sa formation et surtout son âge au moment de la nouveauté. La relation que le chimiste entretient avec l'informatique est nettement

des solutions faites sur les bases théoriques n'était bonne. – PT : *Même pour la chimie moléculaire, ça ne marche pas alors ?* – JG : Ça ne marche pas toujours, je dirais que même si sur le plan de la théorie on peut le faire, c'est bien mais il vaut mieux essayer de le faire vraiment. Parfois il vaut mieux le faire directement. Par la théorie, on peut en créer plein, le problème est de savoir s'ils existent. Je ne crois pas qu'on en soit à pouvoir sortir un composé nouveau avec certitude. En chimie du solide encore moins qu'en chimie moléculaire où ça marche pas mal.. » [I Galy, 2006, p. 23].

¹⁵⁸ « PT : *Il y a un côté prédictif dans votre approche : en regardant le tableau périodique et le cahier des charges, vous parvenez à savoir à peu près quoi choisir ?* – JL : On arrive à modéliser un peu mais ce n'est que dans la tête, à partir de l'observation du tableau périodique, je me dis : tiens, il y a sans doute des gens qui n'ont pas encore essayé de faire ça, je fais un peu de biblio, je m'aperçois que quelques-uns l'ont fait mais ne savaient pas ce qu'ils faisaient. [...] Je continue à raisonner comme ça, il n'y pas d'équation, il n'y pas d'ordinateur, c'est de la simulation macroscopique, de la modélisation avec les mains. Je me rends compte que ça marche pas mal donc je ne me plains pas. » [I Lucas, 2005, p. 17-18].

¹⁵⁹ Cette question constitue une réminiscence (non littérale) de ma formation de chimiste : je l'ai entendue prononcée par Christian Amatore lors d'un cours de DEA « matière molle, chimie et organisation » (Paris 6, 2001-2002) portant sur la théorie du transfert électronique.

¹⁶⁰ « SL : Oui, aujourd'hui il n'y a plus beaucoup de synthèses qui se font sans simulation. Personne ne fait un matériau au petit bonheur la chance en mettant trois produits ensemble, sans savoir ce qu'il fait. » [I Lefrant, 2006, p. 13]. Il s'agit toutefois de nuancer ce jugement puisque l'auteur parle de l'année 2006 et qu'il est lui-même physicien : il a donc tendance à sur-estimer l'importance de la modélisation par rapport à la *sérendipité* de la synthèse à la paillasse.

¹⁶¹ « Prédire une structure nouvelle était effectivement un défi qu'ont relevés quelques rares pionniers au début des années 1990 (citons Catlow, Jansen, Pannetier pour les solides denses, Newsam et mon groupe pour les solides poreux). » [Férey, 2007, p. VII].

corrélée à un positionnement dans la pyramide des âges : les jeunes entrant dans le champ étant mieux disposés vis-à-vis d'un outil nouveau que ceux qui ont travaillé sans lui par le passé. Cette corrélation entre génération et acculturation est aussi perceptible pour la théorie et pour l'instrumentation,¹⁶² avec un décalage dans le temps. Une fois que la mesure physique est intégrée à la « matrice disciplinaire » au cours des années soixante-dix, elle ne menace plus l'identité du chimiste¹⁶³ et tous les solidistes l'ont acceptée comme constitutive de la chimie du solide (III.2.2). Aujourd'hui encore, il est difficile de dire si l'informatique fait partie du paradigme chimique. Aussi elle inquiète encore parce que présentement elle menace l'identité de la chimie. La question cruciale qu'elle pose aux chimistes contemporains est la suivante : que resterait-il de l'identité du chimiste s'il devenait possible de fabriquer les matériaux à la demande, par modélisation informatique ?

Prenons l'exemple de deux doctorants du milieu des années 1960 : Galy et Kahn-Harari. Jeunes cristallogchimistes, c'est avec plaisir qu'ils accueillent (et favorisent) l'entrée de la fée informatique au laboratoire parce qu'ils sont convaincus qu'elle est indispensable à l'étude structurale des solides cristallins. Ils sont les premiers dans leur laboratoire respectif à se familiariser avec la programmation et s'amuse à écrire des programmes basiques pour résoudre des structures simples. Leur démarche surprend leurs directeurs de laboratoire, qui acceptent pourtant l'initiative (VI.2.2.2). À ce moment-là, ces deux jeunes gens sont des vecteurs de l'informatisation du laboratoire. Quand on les retrouve en fin de carrière et qu'on les interroge sur les évolutions induites par l'informatique, leur réponse se veut plus nuancée. Certes, ils insistent sur les avantages très importants : gain de temps, meilleure précision, résolutions structurales décuplées... et sur la rapidité des innovations du numérique (ils avouent n'avoir pas suivi toutes les évolutions technologiques). En revanche, ils sont convaincus qu'en facilitant grandement les calculs l'ordinateur a profondément modifié le comportement des étudiants et des chercheurs plus jeunes – ceux des générations suivantes (1980-2000). Cette opinion est influencée par leur expérience, leur passé, leur histoire : l'« âge d'or » de la cristallogchimie des années soixante, soixante-dix. Au début du millénaire, travail de paillasse et système de croyances se trouvent recomposés. Selon les « anciens », les « jeunes » *solidistes*, trop confiants dans tout ce qui est numérique, manquent de sens critique vis-à-vis des bases de données sous prétexte qu'elles sont données par l'ordinateur, donc justes (les témoins savent, pour avoir contribué à leur mise en place, qu'elles sont construites par des résultats expérimentaux et des êtres humains). Ils sont aussi plus confiants dans les logiciels informatiques et la modélisation. Selon les deux chercheurs en fin de carrière, l'informatique est capable du meilleur comme du pire et les résultats ne doivent pas être pris pour argent comptant. Il ne faut pas que le calcul remplace une intuition – le même mot que Chrétien ! –, un raisonnement. La réflexion est littéralement avalée par la vitesse de calcul des processeurs.¹⁶⁴ Mais le processeur est logiquement déterminé (par des algorithmes) tandis que

¹⁶² Je pense à deux épisodes mettant en scène des jeunes chercheurs revenant de postdoc du début des années soixante-dix : Livage et Vivien font accepter la RPE – et l'utilité de la mécanique quantique – au patron, Collongues (IV.3.3.3), tandis que Galy ne parvient pas à convaincre Hagenmuller d'implanter la microscopie électronique à Bordeaux (IV.4.1.4).

¹⁶³ Par contraste, on peut penser au combat de Chrétien – et d'autres en chimie minérale ou ailleurs – pour la primauté de l'« intuition » chimique sur la mesure physique qu'il mène encore après-guerre (II.1). Avant 1980, tous les solidistes sont convaincus de l'intérêt crucial de la mesure physique.

¹⁶⁴ « *BBV* : *Qu'est-ce que l'informatique a changé dans vos méthodes de travail ?* – Cela a changé complètement la manière de travailler. En cristallographie, il y a beaucoup de calculs. [...] Maintenant, avec l'ordinateur sur le bureau et la rapidité des calculs, quand il y a une erreur, vous dites je recommence, le temps de vous retourner, le calcul est fini. Mais c'est allé trop vite et vous n'avez pas réfléchi. [...] La différence, c'est qu'on réfléchissait beaucoup plus, mais on perdait aussi beaucoup de temps. [...] À la vitesse à laquelle les choses ont progressé, j'ai eu du mal à suivre. – *BBV* : *Quelle est la différence des étudiants entre avant et maintenant ?* – *AK* : Ils sont bons en mathématiques, ils savent bien manipuler les calculs, ils savent convoluer, déconvoluer, simuler les courbes (*fitting*) mais souvent ils réfléchissent moins parce qu'ils peuvent recommencer autant de fois qu'ils

le cortex cérébral ne l'est pas vraiment. Ainsi, si au milieu des années 1960, les deux doctorants ont tendance à porter l'informatique au cœur du laboratoire, en fin de carrière, ils insistent sur les dérives négatives qu'elle a pu induire sur le travail du chimiste.

Le repositionnement vis-à-vis de l'informatique, vue comme « *driving force* » au départ puis comme une composante aliénante (mais utile), caractérise l'appartenance à une génération. De nombreux chercheurs, qui ont commencé leur carrière au cours des années 1960, conçoivent l'informatique selon cette antinomie : à la fois moteur et frein pour le chimiste du solide.¹⁶⁵ À la dérive informatique et calculatoire, ce sont souvent la créativité chimique et l'intuition qui lui sont opposées et qui subissent le plus la révolution numérique.¹⁶⁶ L'informatique induit donc une acculturation à plusieurs vitesses dans les laboratoires de chimie, les jeunes générations étant plus enclines à faire confiance à un nouvel outil que les anciennes (qui portent leur histoire). L'une des principales craintes qu'elle inspire aux chercheurs en fin de carrière est la remise en cause de l'identité du chimiste, en particulier sa créativité en synthèse, à la paillasse. Cette crainte identitaire est contrebalancée par une fécondité nouvelle, couplage du bécher et de l'ordinateur, de la paillasse et de l'appareil de mesure (comme à Caen avec la microscopie électronique inspiratrice de synthèse (VI.2.1.2)).

La dérive instrumentale constitue justement une deuxième évolution majeure qui préoccupe certains chimistes. Elle marque le remplacement d'un artisanat industriel local, en synergie directe avec le laboratoire, par une production instrumentale concentrée entre les mains de quelques multinationales, peu intéressées pour répondre à des sollicitations particulières ou des commandes modestes. Le chimiste, qui pouvait demander un « travail à façon », sur mesure, se trouve désormais dépendant de standards internationaux.¹⁶⁷ Cette perte de souplesse des fournisseurs impose au chimiste une adaptation permanente au marché mondial régi par des logiques autres.

D'autre part, à force de se porter vers les caractérisations physiques, la théorie et la modélisation, certains solidistes auraient perdu la base de leur métier, c'est-à-dire la « cristallographie ». Touche-à-tout les instruments physiques (VI.2.1), soucieux des seuls impératifs de caractérisation, le chimiste du solide aurait renoncé à ses fondamentaux : la synthèse et la diffraction de rayons X.¹⁶⁸ Cette perte de savoir-faire en diffraction des rayons

veulent. Finalement, ils avancent beaucoup plus vite, donc ils ont peut-être plus le droit de se tromper. Ils ont une confiance éperdue dans les bases de données. Moi je sais très bien, pour avoir contribué à des bases de données, qu'elles résultent de manipulations faites par des gens comme vous et moi et que ce n'est pas la Bible. C'est la première chose que je dis aux élèves quand ils arrivent en cristallographie : il peut y avoir des erreurs dans les bases de données. Pour eux, une base de données, c'est dans l'ordinateur - donc c'est fiable. [...] – » [I Kahn-Harari, 2004, p. 11-12].

¹⁶⁵ « Si je commence par les avantages, je dirais qu'ils sont doubles. [développement de tous les instruments de la physique et modélisation]. Pour les inconvénients, je pense que l'informatique est un bon moyen de perdre du temps : on nous demande de plus en plus de rapports sous prétexte que c'est plus rapide maintenant, on reçoit beaucoup de e-mails inutiles, les étudiants passent plus de temps devant leur ordinateur qu'à la paillasse. » [I Pouchard, 2004, p. 32].

¹⁶⁶ « PT : Vous dites que les générations suivantes ne font plus comme ça ? – JL : Non, ils ne font plus ça, je ne sais pas d'où ça vient : je leur ai peut-être mal enseigné la chimie quand ils étaient à l'école d'ingénieurs, mais j'ai eu des normaliens aussi qui faisaient pareil. J'ai l'impression que c'est une question de génération ; ce qui nous a foutu en l'air, ce sont les ordis, le fait que ça devienne ringard de faire de la chimie, que les gens veulent avoir des courbes, qu'ils pensent que la mesure physique est plus glorieuse. » [I Lucas, 2005, p. 18].

¹⁶⁷ « Les très nombreuses petites entreprises ou ateliers qui permettaient d'obtenir du travail à façon, d'acheter du matériel en petites quantités, ont été absorbées par quelques grandes entreprises. Celles-ci ne livrent que pour des commandes importantes, ne fournissent qu'un appareillage non modifiable... Il faut de plus en plus subir et s'adapter. » [I Hérold, 2007, p. 8].

¹⁶⁸ « Au CNRS (et à l'université) les chimistes du solide ne font presque plus de synthèse, ils ne font plus vraiment leur premier métier. » [I Colomban, 2003, p2] « Il y a un point qui me chagrime beaucoup en chimie du

X concerne les solides cristallins pour lesquels la diffraction des rayons X avait le plus de sens (à la différence des amorphes par exemple). Elle va de pair avec un déclin du statut dominant des cristaux tridimensionnels et l'essor de nouveaux solides (VI.1.3). Elle marque une « physicalisation » [Reinhardt, 2006] de la chimie du solide poussée par un désir de faire comme le physicien au risque de perdre son excellence en synthèse sans acquérir celle du physicien en caractérisation.¹⁶⁹ Devenu dilettante de la détermination structurale, le *solidiste* nouveau genre utiliserait la souplesse de l'informatique pour contourner la rigueur imposée par la diffraction des rayons X (IV.conclusion). Avec la spectroscopie par exemple, il semble plus facile de modifier le signal pour obtenir un résultat significatif. Un physicien expérimentateur, comme Denis Jérôme, émet le même type de crainte sur la dérive instrumentale-informatique qui permet de fabriquer « du » résultat. Les convergences de vue entre Galy et Jérôme sur l'instrument couplé à l'informatique comme producteur d'artefacts sont vraiment saisissantes.¹⁷⁰ À force de vouloir (et devoir ?) faire trop, à la conjonction de nombreuses techniques, le chimiste ne ferait-il plus rien de bien ?

Les années 1980 marquent donc un élargissement des méthodes instrumentales, fortement lié à la popularisation et l'amélioration de l'outil informatique mais aussi aux besoins nouveaux en caractérisation de solides de plus en plus divers et exotiques. Le solide cristallin et la diffraction des rayons X, qui avaient été les références indiscutables des décennies soixante et soixante-dix, sont concurrencés par de nouveaux composés et de nouveaux instruments. L'informatique constitue un formidable instrument qui, semble-t-il, menace l'identité du chimiste du solide, centrée sur la synthèse et la cristallographie. Associée à la caractérisation physique, elle remet en question la primauté du cristallographe au sein des laboratoires de chimie des solides. Les physico-chimistes y sont devenus plus influents à partir des années soixante-dix puis quatre-vingt. Les nouvelles générations sont de plus en plus tentées par l'approche théorique, mathématique de la chimie et les modélisations, courantes à partir des années 1990. Ceux-là mêmes qui avaient favorisé dès les années 1960 l'introduction de l'ordinateur au laboratoire s'inquiètent de la perte de créativité ou de rigueur que peut engendrer un trop large recours au numérique. Ces évolutions de mentalités, de pratiques de laboratoire, de savoir-faire valorisés s'accompagnent d'une réorganisation de la recherche scientifique universitaire.

solide : c'est le nombre de papiers où les gens déterminent des structures sur des diagrammes de poudres par un programme avec la méthode de Rietveld, la méthode est excellente mais ce qu'en font les gens c'est n'importe quoi. – PT : *Même dans les journaux sérieux ?* – JG : Oui et même par des laboratoires sérieux, ce qui me navre encore plus. » [I Galy, 2006, p. 26].

¹⁶⁹ Les chimistes du solide « font le travail des physiciens qui eux repassent après pour "améliorer" les modélisations des chimistes. » [I Colomban, 2003, p. 2]. « PT : *Est-ce que ça veut dire qu'il y a un savoir de cristallographie qui se perd ?* – JG : Qui s'est perdu ! Il y a une exigence qui s'est perdue en cours de route. C'est dû notamment à des gens qui ont attaqué la cristallographie de façon stupide. Hagenmuller en fait partie, je ne comprends pas comment un homme intelligent comme lui ait pu sombrer là-dedans, il ne faut pas confondre l'animosité qu'on peut avoir pour un cristallographe avec la science cristallographique, c'est tout à fait différent » [I Galy, 2006, p. 26].

¹⁷⁰ « On affine n'importe quoi et à partir du moment où on affine n'importe quoi, à partir d'un même point, on peut discerner un rat ou un éléphant ! » [I Galy, 2006, p. 26]. « La physique ce n'est pas des calculs, malheureusement, l'aspect intuitif disparaît au profit de la modélisation tous azimuts. On peut faire de faux articles avec l'ordinateur. » [I Jérôme, 2006, p. 18].

VI.3. Administration de la recherche : évolutions culturelles, options politiques et contexte économique

La croissance de la recherche publique d'après-guerre, la remise en cause culturelle des années 1960 et la crise économique des années 1970 bouleversent l'Université. Quelles conséquences ont-elles sur l'administration et l'autonomie des laboratoires de chimie du solide ?

VI.3.1. Transformation du laboratoire : du cercle familial à l'institut interdisciplinaire

VI.3.1.1. L'après Mai 68 au laboratoire

La question de l'impact de Mai 68 sur l'université française reste controversée. Statistiquement, le printemps 1968 touche différemment les générations : la position sociale (technicien/chercheur) et l'âge sont des critères d'analyse pertinents. Le CNRS est moins affecté que l'université [Picard, 1990, p. 229] car moins symbolique, moins visible et plus éloigné du Quartier latin. Pourtant, sous la poussée démocratique, les conseils de laboratoire sont étendus aux non chercheurs à partir de 1968, incluant ainsi les personnels ITA (ingénieurs, techniciens et administratifs). Le comité national se dote d'une représentation en ITA (collège C) à partir de 1970 [Lanciano-Morandat, 1999, p. 142]. Est-ce à dire que le personnel technique, considéré comme hiérarchiquement et scientifiquement subalterne, est mieux reconnu par la « République des savants » [Picard, 1990] à partir de là ?

Rien n'est moins sûr. Certes, les « aides individuelles » du CNRS – qui consistaient à affecter techniciens et matériel à un chercheur reconnu – ont été supprimées. Cependant, la démarcation chercheur/technicien subsiste, voire s'accroît. « Les industriels siégeant au Comité national dans les sections de chimie *"sont choqués par la répartition arbitraire entre les cols blancs et les cols bleus"*. » Les corps de métier sont clairement distingués : alors que la carrière des chercheurs est évaluée au niveau national (Comité national ou Conseil des universités), celle du personnel technique, parce qu'elle est sensée s'inscrire dans « l'organisation hiérarchique du laboratoire », dépend des directeurs de laboratoire [Lanciano-Morandat, 1999, p. 55]. Si nombreux sont les étudiants des années 1950, 1960 qui ont commencé leur thèse à un poste technique avant d'être titularisés comme chercheur, nombreux les techniciens à qui le directeur de laboratoire proposait une thèse (jusque vers 1980), le passage est de plus en plus difficile par la suite. La perméabilité diminue et toute migration doit être justifiée par un impératif.¹⁷¹

¹⁷¹ « Je suis venue en France en 1964, j'ai trouvé tout de suite un poste de remplacement, comme aide-chimiste, dans le laboratoire de Félix Trombe, dans le groupe de Blandin. En 1965, j'ai été embauchée comme chercheur au CNRS et j'ai commencé ma thèse » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 1] « Entre-temps, j'étais entré au CNRS comme technicien 1B en 1976 parce que c'était la seule place libre, puis assez rapidement, en 1979, je suis devenu ingénieur de recherche. Je le suis resté jusqu'en 1999 [...] En fait, si je suis passé professeur, c'est essentiellement pour des raisons administratives [...] C'est un parcours professionnel complètement atypique. » [I Ouvrard, 2006, p. 2]. « J'ai été embauchée comme technicienne chimiste [1978]. [...] Au tout début, j'ai même eu la chance de suivre les cours de Monsieur Rousset pour me former à la cristallographie et il m'avait même proposé de passer une thèse. Je n'ai pas voulu faire de thèse parce que je ne pensais pas être la hauteur, je n'avais pas confiance en moi et je ne souhaitais pas reprendre les études. » [I Bonino, 2006, p. 1, 4].

Même si les relations au sein d'un laboratoire dépendent des êtres humains qui y vivent, on peut essayer de tracer quelques évolutions. Deux causes en particulier produisent les mêmes effets : la croissance des laboratoires et la bureaucratisation de la recherche. Elles conduisent à une spécialisation et une dépendance accrues des techniciens. Lorsque l'équipe est petite, les rôles sont plus informels. Chacun se sent investi dans l'effort collectif, le directeur du laboratoire comme le technicien se donnent « à fond dedans ». Se sentir utile et impliqué favorise en retour une implication effective et la créativité augmente. Le technicien ou la technicienne participe à l'effort de recherche : optimisation de paramètres, co-signature de publications, co-auteurs de brevets... et la distinction technique/scientifique s'estompe. Les relations sont plus humaines et moins sociales même si le respect hiérarchique est fort¹⁷² et le déséquilibre cognitif bien présent : un technicien, par sa formation plus appliquée (BTS par exemple), peut ressentir un manque sur les questions théoriques. À aucun moment, directeur et technicien ne remettent en cause la polarisation savoir-pouvoir et chacun accepte cette division du travail. Formant les doctorants qui arrivent, le technicien expérimenté peut discuter d'égal à égal avec eux, sans rapport de pouvoir.¹⁷³

Quand le laboratoire grossit, la hiérarchie devient plus sensible : le statut compte plus que la valeur. Les techniciens, qui, dans une petite structure, pouvaient être consultés sur des questions de fond : orientation ou stratégie, ne donnent plus leur avis que sur tel ou tel instrument dont ils s'occupent.¹⁷⁴ Au niveau des représentations, on envisage le personnel technique dans ses seules relations avec l'instrument. Peu reconnu au niveau scientifique – les compétences techniques n'étant pas valorisées dans la culture française – le technicien est considéré comme « moyen de la recherche » par le système universitaire et parfois par les

¹⁷² « Monsieur Rousset fait en règle générale entièrement confiance aux personnes avec lesquelles il travaille. Chacun des deux donnait son avis, les siens scientifiques, les miens plus intuitifs. C'était très valorisant. – PT : *Vous participiez beaucoup alors ?* – CB : C'était une petite structure qui permettait cela. Étant technicienne, ce que j'ai fait ici, je n'aurais sans doute pas pu le faire ailleurs. J'aurais été moins impliquée en amont sur le plan scientifique mais aussi sur la "vie" du laboratoire en général. J'étais vraiment investie à fond dans le travail du groupe. [p. 2 ...] La position que j'avais comme participante me suffisait [p. 4 ...] C'est important pour moi, je ne me serais sans doute pas autant impliquée sans ce sentiment de participation. J'étais "à fond dedans", sans compter les heures ou les vacances passées à travailler; j'avais la même hargne que lui pour que ça débouche. » [I Bonino, 2006, p. 3].

¹⁷³ « J'ai tout appris au laboratoire ; la thèse de Gilles Dupré, entre autres, un des étudiants de Monsieur Rousset à Lyon, était d'ailleurs ma "bible" au début (rires), pour comprendre et acquérir des connaissances sur la chimie du solide. [p. 2 ...] Bien qu'ayant une formation de chimie organique, mon problème essentiel n'était pas à la paillasse où l'on peut très rapidement s'adapter. Ma grosse lacune (sic) était plutôt au niveau théorique. J'ai été plus marquée par ce que j'ai appris au niveau théorique avec Monsieur Rousset que par ce que j'ai appris à la paillasse. [p. 2-3] Mon travail consistait à faire varier différents paramètres : composition, choix des éléments introduits, des solvants, vitesse d'introduction des réactifs, etc... Notre but était d'améliorer la morphologie par la maîtrise de ces nombreux paramètres afin d'obtenir une morphologie particulière : des aiguilles de 0.1 à 0.3 µm qui puissent s'orienter sous un champ magnétique, comme le feraient des aimants. [...] J'ai participé à des publications et des brevets [...] avec les étudiants, il faut s'assurer, du moins au début, que le message passe bien, il faut expliquer pourquoi le contrôle des paramètres est important même si certains paraissent secondaires. La plupart des étudiants avaient une formation matériaux et étaient donc moins formés à la rigueur de la chimie. » [I Bonino, 2006, p. 1-3].

¹⁷⁴ « Pendant toute la période où j'ai fait de la chimie, j'ai toujours été impliquée dans les réunions de groupe sur les questions de recherche, sur l'avancée des travaux d'abord avec Abel Rousset, avec Philippe Tailhades ensuite. [...] Immanquablement, quand l'entité grossit, ce sont seulement les chercheurs qui se réunissent entre eux pour décider des orientations de la recherche et mener la politique interne et externe du laboratoire. Le personnel technique peut donner son avis quand il y a des problèmes spécifiques, sur les appareils par exemple. [...] Je pense donc qu'un ingénieur entrant aujourd'hui ne pourrait pas développer un sujet de recherche comme il aurait pu le faire il y a une quinzaine d'années. Plus une structure est importante, plus une pyramide est inévitable et les tâches définies en fonction des statuts de chacun. Le titre vaut plus que la valeur ? ... Vaste question ! [...] J'ai dû faire un choix à un moment donné : la gestion occupait un temps plein. J'ai alors dévié vers 1998 sur le poste de gestionnaire du laboratoire. Si j'ai pris cette voie là, ce n'est peut-être pas anodin; une façon sans doute pour moi de garder une certaine autonomie. » [I Bonino, 2006, p. 3-6].

chercheurs eux-mêmes jusqu'à aujourd'hui.¹⁷⁵ Au cours du processus de bureaucratisation (de la recherche ou du laboratoire), la tâche des techniciens devient d'ailleurs plus répétitive, moins créative et moins intéressante.¹⁷⁶ L'évolution s'appuie sur une acceptation réciproque de la division du travail. Engagé à un poste technique, le technicien doit fournir un travail technique pour le bien commun du laboratoire (c'est-à-dire l'intérêt des chercheurs). Avec la croissance des laboratoires, les rôles de chacun se figent donc dans des métiers. Durant les vaches maigres des années 1980, le personnel technique est aussi plus touché par la précarité que les chercheurs. Parfois recruté sur un contrat industriel ponctuel, il dépend du renouvellement de contrats à durée déterminée (CDD). Situation précaire et doute permanent qui font espérer une titularisation. Lorsque les contrats ne sont pas renouvelés, c'est le départ vers l'industrie, forcé mais souvent réussi.¹⁷⁷ Si la titularisation a lieu, des années d'ancienneté sont souvent perdues dans le décompte.¹⁷⁸ La possibilité de promotion en tant qu'ITA reste quasi-inexistante, contrairement aux chercheurs, qui peuvent gravir les échelons administratifs des corps de l'État. Avec comme seul objectif une augmentation régulière (et automatique) de salaire, la motivation est d'autant plus difficile à garder que l'on ne se sent pas impliqué dans les décisions générales d'une équipe ou d'un laboratoire.¹⁷⁹ Ainsi, la

¹⁷⁵ Les ITA « ont été d'abord pendant de nombreuses années considérées comme "un moyen de la recherche", au même titre que l'équipement » [Lanciano-Morandat, 1999, p. 55]. « il existe un hiatus au CNRS et quand on est ingénieur de recherche, on est un peu considéré comme du matériel. Par exemple, on ne peut pas participer à la commission de spécialistes. C'est donc administrativement très difficile de gérer un laboratoire quand on est ingénieur de recherche. Aujourd'hui, je préside cette commission où en tant qu'ingénieur de recherche, je n'avais pas le droit de siéger ! J'ai même vu certaines personnes qui me connaissaient depuis vingt ans changer de discours quand je suis passé professeur : ça existe encore ! » [I Ouvrard, 2006, p. 2].

¹⁷⁶ « Avec les chercheurs, ce sont eux qui pensent à quelque chose, vous disent "est-ce qu'on ne pourrait pas faire ça ?". – PT : C'est un travail répétitif ? – CB : Oui, plutôt. – PT : C'est aussi pour ça que j'ai arrêté la chimie et que j'admire ceux qui y arrivent ! (rires) – CB : La synthèse et les traitements thermiques sont des opérations répétitives. Etudier l'influence de différents paramètres est parfois fastidieux surtout quand les résultats ne sont pas à la hauteur des espérances ! Je crois que la finalité suffit; j'étais axée sur les résultats, les débouchés. Le fait de travailler avec des industriels étaient un facteur supplémentaire de motivation. Ça ne me gênait pas de passer du temps sur un même système. » [I Bonino, 2006, p. 3-4].

¹⁷⁷ « CB : Nous avons surtout un gros problème de personnel en situation précaire, chacun espérant un jour "tirer le ticket de la titularisation". Le CIRIMAT compte une vingtaine de contractuels, essentiellement ingénieurs et techniciens, payés sur des contrats. Les titularisations sont assez rares et souvent après 5 à 8 ans de CDD. – PT : Vous-même avez été contractuelle. Ce n'est pas trop dur à vivre ? – CB : Oui, 11 ans. Au début c'est dur, puis au fil des années, on "s'habitue". Chaque année, on signe un nouveau contrat en essayant de ne pas trop s'inquiéter. Les premières années ont été les plus difficiles. Le laboratoire démarrait et il n'était alors pas reconnu. [...] PT : Il doit y en avoir qui ne sont pas renouvelés, non ? – CB : Oui, ça arrive mais la plupart, plus de 90%, ont retrouvé du travail à l'extérieur de l'Université, preuve de la qualité de la formation qu'ils ont reçue au laboratoire. [...] J'ai été embauchée comme technicienne chimiste [1978]. Le contrat était alors financé par un industriel : Rhône-Poulenc. Le CDD était renouvelé chaque année. Quelques années plus tard, j'ai été prise en charge par l'Université, toujours sous contrat. Sur l'ensemble de ma période contractuelle qui a duré 11 ans, j'ai été payée pour moitié sur des contrats industriels et pour moitié sur le budget propre de l'Université. » [I Bonino, 2006, p. 4-5, 1].

¹⁷⁸ « PT : Et pour votre ancienneté par rapport à la retraite ? – CB : J'ai perdu trois ans d'ancienneté sur les onze que j'avais faits. Avec le recul ça laisse un goût amer, mais au moment où vous êtes titularisé, vous êtes trop content pour vous arrêter à ça. Je ne suis pas à plaindre : une personne est entrée au laboratoire comme CES. Vous connaissez ? – PT : Non... – CB : Contrat Emploi Solidarité. C'était des incitations à la création d'emploi dans la fonction publique ... et un bon moyen de faire baisser les statistiques du chômage ! Une partie du salaire est payée par l'Etat, l'autre par l'employeur, ici l'Université, sur une durée maximale de 5 ans. Cette technicienne a donc travaillé cinq ans avec nous et récemment, lors de sa titularisation, le CES étant un contrat de droit privé, son ancienneté n'a pas été prise en compte ! » [I Bonino, 2006, p. 5].

¹⁷⁹ « Autant une réelle possibilité de promotion existe pour les chercheurs et enseignants-chercheurs, autant elle est quasi inexistante pour le personnel technique. Un réel problème, source de démotivation de nombreux agents. [...] actuellement, sans vouloir volontairement nous écarter des décisions, les chercheurs n'impliquent pas suffisamment le personnel technique. C'est dommage parce que celui-ci a un autre point de vue, une autre façon

bureaucratization de la recherche tend à draper les êtres humains dans des rôles sociaux, à les faire dépendre plus d'un statut professionnel, d'un diplôme universitaire que d'une pratique quotidienne et d'une originalité individuelle.

Mai 68 ne modifie pas vraiment l'organisation hiérarchique des laboratoires. Le chercheur continue d'être « affecté à un directeur » jusqu'en 1980, où il est rattaché à un laboratoire [Lanciano-Morandat, 1999, p. 52]. Les directeurs, ceux-là mêmes qui restent aux commandes, sont aussi les moins sensibles aux mouvements de protestation de la jeunesse puis de la « classe ouvrière ». Des mandarins de la Sorbonne comme Chaudron ou Chrétien conservent leur chaire. Mai 68 ne remplace pas les personnes au pouvoir. À Bellevue, Trombe reste le « patron » incontesté de son laboratoire, distant vis-à-vis des étudiants et des plus jeunes chercheurs.¹⁸⁰ À Vitry-sur-Seine, si les événements de Mai inquiètent un peu plus le patron, il vient moins souvent au laboratoire.¹⁸¹ À la fin des années 1960, les mandarins disposent toujours d'une aura touchant parfois à la dévotion et demeurent quasiment intouchables pour le commun des chercheurs de la communauté. Globalement, les mandarins ne modifient par leur comportement après Mai 68.¹⁸²

Les nouveaux chefs – doctorants vers 1950 – comme Tridot, Hagenmuller, Freundlich, Flahaut, Hérold, Collongues ou Deschanvres, conservent eux-aussi la tête de leur laboratoire ou leur équipe de recherche et continuent de diriger en déléguant à des lieutenants qui leur sont dévoués [Teissier, 2006]. Ils sont globalement plus affectés que leurs aînés par la crise culturelle du monde occidental : plus jeunes, plus proches au laboratoire des doctorants, probablement influencés par leurs propres enfants (s'ils en ont). Les conditions s'assouplissent plus ou moins suivant les cas, mais plutôt lentement, au cours des années 1970.¹⁸³ Malgré Mai 68, l'autorité de ces nouveaux mandarins demeure très forte au sein de leur laboratoire (chapitre IV) et en dehors (III.4.2)¹⁸⁴ même si les comportements se modifient peu à peu. Les chefs

d'aborder les problèmes. En plus, une personne qui se sent impliquée va donner en retour sans compter ses efforts. » [I Bonino, 2006, p. 6].

¹⁸⁰ « PT : *Et Trombe, en tant de directeur de thèse ou de laboratoire, comment était-il ?* – EA : C'était le grand patron, il y avait une distance par rapport à moi mais avec les autres étudiants aussi je crois. [...] Lui, c'était le Monsieur : je me rappelle qu'une fois, je lui ai dit "Monsieur Trombe" et il n'était pas content, il fallait dire "Monsieur". – PT : *Même par la suite, quand vous étiez chercheur c'était la même distance ?* – EA : Oui, je crois que c'était comme ça. Peut-être qu'il nous impressionnait aussi. Mais tous ceux de la génération de Trombe étaient pareils. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 3].

¹⁸¹ « PT : *A quel moment l'avez-vous ressenti ?* – DS : Après 68. 68 a vraiment été le déclencheur, c'est ce que j'ai mis un peu plus loin : "le grand chambardement, les patrons du CECM n'apparaissent plus qu'épisodiquement." Ils n'osaient pas venir. Avant 68, les chefs de service du CECM sortaient le tapis rouge lorsque Chaudron arrivait (rires). C'était le mandarinat, le patron tout puissant avait toujours raison. » [I Serreau, 2004, p. 4].

¹⁸² « PT : *J'ai vraiment du mal à me rendre compte de cette atmosphère.* – EA : Ces gens-là avaient une telle aura qu'ils paralysaient les gens. Je me rappelle que pour ma première publication, je suis allé avec Paul Caro voir Alfred Kastler, prix Nobel, Paul Caro était un petit garçon mais vraiment. C'était plus que du simple respect. Je ne pense pas qu'aujourd'hui c'est encore comme ça [...] – PT : *Vous pensez que Mai 68 a changé des choses ?* – EA : Ma publication était en 1969, donc juste après 68, ça n'a pas tellement changé. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 4]. « PT : *[Chaudron] n'a pas vu passer 68 ?* – DS : Non, il était trop âgé presque 80 ans, ça n'a pas eu beaucoup d'effet. » [I Serreau, 2004, p. 4].

¹⁸³ « "1978, j'arrive à l'ENSCP où l'équipe Collongues est déjà installée. Un air léger, détendu, souffle sur l'École. Le patron n'est plus le même." – DS : Oui, c'est vrai. Le patron avait réellement changé dans ses rapports humains. – PT : Donc c'était entre le moment où il est parti [1972] et où vous êtes arrivée [1978] ? – DS : Je pense qu'il y a eu Mai 68, bien sûr ! Être à l'ENSCP aussi, peut-être, changer d'air, avoir plus de responsabilités, je ne sais pas. Et puis, le fait que ses enfants grandissaient l'a sans doute fait évoluer aussi. » [I Serreau, 2004, p. 4]. Trombe était « le grand patron [...] Ça a changé ensuite quand les nouvelles générations sont venues. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 3].

¹⁸⁴ « PT : *Il était directif ?* – MP : Oui Hagenmuller était quelqu'un d'autoritaire, mais qu'on pouvait convaincre avec doigté en cas de désaccord. » [I Pouchard, 2004, p. 23]. « En fait, le départ de Casalot a une histoire : en

acceptent plus de déléguer, sont plus accessibles, reçoivent plus volontiers les étudiants dans leur bureau, même sans rendez-vous et non plus selon leur humeur.¹⁸⁵ Réciproquement aussi, les jeunes se montrent plus entreprenants.

C'est probablement la troisième génération, celle des thésards de la décennie soixante, qui est la plus marquée par l'esprit soixante-huitard. Même si les doctorants sont sensiblement plus âgés que les étudiants qui manifestent dans les rues, qu'ils sont parfois mariés et ont des enfants quand ils terminent leur thèse, ce sont eux sans doute qui – avec les techniciens ? – sont les plus sensibles à la révolte estudiantine. Tout en apportant une créativité nouvelle – « sans thésard, on n'aurait pas de publications » [I Kahn-Harari, 2004, p. 10] –, les doctorants subissent de plein fouet les règles sociales anciennement instaurées au laboratoire : rigueur vestimentaire, respect de la parole du patron, de la hiérarchie, volume horaire important... Il est alors jugé normal de donner beaucoup pour le groupe, de passer beaucoup de temps au laboratoire, parfois au détriment de sa vie personnelle.¹⁸⁶ Certains l'acceptent mieux que d'autres mais c'est probablement pesant pour la plupart des jeunes gens.¹⁸⁷

À nouveau, comme pour les années cinquante, la place des femmes chercheurs au laboratoire n'est pas facile. On leur demande souvent plus que leurs homologues masculins : elles doivent faire leur preuve pour être prises au sérieux, pour faire accepter leur présence et légitimer leur travail. La critique féministe des années soixante peine à imposer une situation égale entre homme et femme. Les rôles culturels fixés par la société sont larvés au sein du laboratoire. La plupart des directeurs de laboratoire sont des hommes même si certaines – Anne-Marie Antony, Françoise Gaume, Annick Percheron-Guegan – parviennent à s'imposer dans un monde universitaire masculin. Que ce soit dans l'industrie ou à l'université, leur avenir est aussi plus incertain,¹⁸⁸ la progression de leur carrière souvent plus lente. La

1968, l'un d'entre nous Galy a cru que la période des mandarins puissants était finie et il est alors entré en conflit avec Hagemuller provoquant un véritable schisme au laboratoire qui s'est soldé par son départ pour Toulouse [en 1975]. Cet épisode difficile, voire douloureux, a fait que Casalot, très proche de Galy, est parti lui aussi. » [I Pouchard, 2004b, p. 12].

¹⁸⁵ « "1978, j'arrive à l'ENSCP où l'équipe Collongues est déjà installée. Un air léger, détendu, souffle sur l'École. Le patron n'est plus le même." – DS : Oui, c'est vrai. Le patron avait réellement changé dans ses rapports humains. – PT : Donc c'était entre le moment où il est parti et où vous êtes arrivée ? – DS : Je pense qu'il y a eu Mai 68, bien sûr ! Être à l'ENSCP aussi, peut-être, changer d'air, avoir plus de responsabilités, je ne sais pas. Et puis, le fait que ses enfants grandissaient l'a sans doute fait évoluer aussi. » [p. 4]. « J'ai été étonnée d'ailleurs, lorsque je suis arrivée ici définitivement, de voir que les étudiants rentraient dans son bureau, frappaient quand même avant d'entrer, mais rentraient, le dérangent, lui posaient des questions et lui, répondait gentiment (rires). Alors ça, m'a beaucoup étonnée. Les rapports avaient complètement changé, alors qu'avant, quand on était au CECM, s'il nous arrivait d'avoir besoin de lui poser une question, je lui demandais quand est-ce que je pourrais venir ou un tel pourrait passer, on prenait des rendez-vous. Là, les étudiants n'avaient pas de rendez-vous, ils entraient dans le bureau et posaient leurs questions. » [p. 8] « oui, ça aussi Collongues s'est mis à le faire beaucoup plus après 68, déléguer, avant il s'occupait de tout. » [I Serreau, 2004, p. 14].

¹⁸⁶ « à l'époque, je me souviens, il n'y avait pas de chargé de famille. Monique Perez, Jeanine Théry Anne-Marie Lejus, Francine Queyroux n'ont pas été mariées ou n'ont pas eu d'enfants, elles restaient tard le soir. Revcolevschi et Galtier ne se sont pas mariés très tôt et Jean-Claude Gilles est resté vrai célibataire. Ne déduisez pas de cela que Collongues demandait à ses chercheurs un engagement monacal. Donc tout ce monde-là était disponible et restait très tard, souvent, le soir. Apparemment, ça se faisait, je me souviens qu'il n'était pas question de partir à cinq heures et demie, six heures le soir, ça pouvait durer jusqu'à huit heures. » [I Serreau, 2004, p. 7].

¹⁸⁷ « Galtier demandait souvent à discuter avec lui, il restait tard le soir. [...] – PT : Et vous, vous pouviez partir plus tôt ? – DS : Tout le monde restait tard le soir. Au début je ne partais pas très tôt, par la suite je partais plus tôt que les autres. – PT : C'était voulu par Collongues ? – DS : Il aimait bien discuter le soir [...] et retenir les gens, ça lui plaisait bien, oui. Les veilles de vacances, on rasait les murs pour ne pas se faire coincer (rires) ! Ca, c'était le mandarinat ancienne époque, selon Chaudron. Quelques vieilles habitudes. » [I Serreau, 2004, p. 7].

¹⁸⁸ « PT : Y avait-t-il des femmes dans vos équipes de recherche au début ? – MT : Certes, il n'y en avait pas autant que chez Collongues ! Chez Hagen ? Hagen avait la réputation d'être misogyne, il y avait quand même quelques femmes dans son laboratoire à mon époque déjà [années soixante] mais qu'il traitait très durement, il

maternité n'est pas encore acceptée dans les années soixante-dix. Certes, la situation est moins catastrophique que dix ou vingt ans plus tôt, mais elle reste difficile et mal comprise par les collègues, qu'ils soient hommes ou femmes.¹⁸⁹ Les revendications féministes ont sans doute suscité un écho parmi les (encore) peu nombreuses doctorantes des laboratoires. Aujourd'hui encore, même si elle est souvent mieux comprise dans le milieu universitaire, la maternité reste souvent difficile à gérer pour une femme en laboratoire. Parfois aussi, pour une étudiante en thèse dans le public désirant poursuivre sa carrière en industrie, la thèse représente le moment propice pour une maternité.

Les doctorants des années 1960 constituent la génération qui va commencer à diriger les équipes de recherche à partir des années 1970 et 1980. Une modification des rapports de production va donc peu à peu se mettre en place au laboratoire. Quand les hippies d'hier deviennent directeurs de laboratoire, la hiérarchie s'assouplit mais reste latente, les tenues vestimentaires et coupes de cheveux se diversifient, les mœurs sont moins strictes... Pendant que les empires scientifiques d'après-guerre se disloquent, « une certaine démocratie » locale se met en place dans les laboratoires et le népotisme mandarinale est remplacée une nouvelle oligarchie post-soixante-huitarde.¹⁹⁰

L'un des aspects de la démocratisation concerne l'encadrement des thèses. Durant la période d'essor de la chimie du solide (1960-1970), l'organisation officielle du laboratoire est centralisée : le directeur dirige officiellement la quasi-totalité des thèses de « son » laboratoire. En pratique, il délègue l'encadrement quotidien aux « colonels » qui servent de liens entre les doctorants et le patron (IV.3, IV.4). Les premiers thésards de Collongues ou Hagenmuller par exemple commencent très tôt à encadrer les étudiants plus jeunes, avant même la fin de leur propre thèse chez Hagenmuller. Par la suite, les lieutenants et *lieutenantes* du patron conservent ce droit de préséance et continuent à diriger les nouveaux entrants dans leur équipe. Les premiers étudiants, devenus chercheurs, se retrouvent eux sans étudiants :

ne comprenait qu'elles pouvaient être enceintes, qu'elles pouvaient allaiter leur gosse... c'était assez épouvantable (rire) mais il y en avait quelques-unes. Chez nous, Jean Rouxel disait toujours "prenez des filles si vous voulez mais vous vous débrouillerez pour les caser !" Moi j'en ai eu, j'en ai casé quelques-unes. – PT : *C'était plus dur pour elles dans l'industrie et au CNRS ?* – MT : Dans l'industrie, oui bien sûr, mais au CNRS non, si elles avaient le niveau, si elles s'accrochaient, ça ne posait pas de problèmes. Les filles en maîtrise sont souvent plus brillantes que les garçons, plus consciencieuses, mais après dans le laboratoire, face à l'expérience, c'est plus dur mais il y en a qui se débrouillent très bien. – PT : Il y a donc une différence entre ce qui se passe en cours et au laboratoire ? – MT : Oui, il y a peut-être une question de psychologie, d'initiative... C'est une question un peu difficile, un peu sociologique aussi. Elles ont souvent des difficultés de communication. » [I Tournoux, 2006, p. 13].

¹⁸⁹ « j'ai commencé ma thèse en septembre 1948 au CECM [...] Je me suis arrêtée en novembre 1949 pour mon premier enfant. Après ma maternité, je ne voulais plus être chercheuse, c'est dur quand on a un enfant et puis j'étais toujours plus attirée par l'enseignement : je voulais passer l'agrégation. Chaudron m'a dit qu'il ne fallait pas que je m'embête avec l'agrégation, que j'allais d'abord finir ma thèse en deux ans. Elle a encore duré huit ans ! » [I Mondange, 2004, p. 2]. « J'étais la première dame mariée qui a eu un enfant. Certaines étaient mariées sans enfant et d'autres n'étaient pas mariées. (A l'époque quand on n'était pas marié, on n'avait pas d'enfant !). Je m'en allais à six heures, le soir, parce qu'il fallait que j'aille chercher le bébé. Les autres ne comprenaient pas bien ce genre de choses. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 4].

¹⁹⁰ « Jacques Livage [...] est un homme post-soixante-huitarde je dirais, qui était tout à fait dans la nouvelle vague démocratique au laboratoire. Il a été extrêmement fort parce qu'il a réussi à sauvegarder une certaine démocratie tout en étant le patron, il a réussi à ménager la chèvre et le chou assez astucieusement [...] sachant se débrouiller dans la communication, moderne en même temps, c'est quelqu'un d'intéressant. Assez carriériste tout de même malgré le côté "tout le monde il est beau, tout le monde il est gentil", je trouve qu'il s'est bien débrouillé : professeur au Collège de France et académicien. [...] PT : *On m'a dit qu'il avait eu sa période baba-cool non ?* – DS : Oui, en 68, il a vécu, d'après ce que j'ai cru comprendre, avec des groupes de jeunes, des hippies carrément, il avait les cheveux longs. – PT : *Il venait au laboratoire avec des cheveux longs ?* – DS : Oui, j'ai même des photographies où il se trouve avec des cheveux longs. Mais il en est revenu comme tous les autres » [I Serreau, 2004, p. 11].

« un jeune ne dirigeait pas une thèse si un plus âgé pouvait la diriger ». ¹⁹¹ Le roulement dans l'encadrement des thèses n'est donc pas équitable mais régi par un droit d'aînesse. Certains chercheurs – les lieutenants – dirigent donc beaucoup de thèses, ce qui leur permet de créer et de publier plus (alors que la thèse résulte aussi d'aide informelle par les chercheurs plus jeunes). Comme pour les techniciens, la créativité et la reconnaissance des plus jeunes chercheurs sont probablement sous-estimées par rapport à celles de leurs aînés. Et ce, d'autant plus que l'on ne cherche pas à s'imposer, que l'on n'est pas « arriviste » et que l'on passe beaucoup de temps à s'occuper quand même des thésards – officiellement dirigés par quelqu'un d'autre –. Dans ce cadre, les femmes auraient alors plus tendance à aider sans compter, à être plus « maternantes » vis-à-vis des étudiants. ¹⁹² Rôle culturel reproduit dans le microcosme social qu'est le laboratoire ?

Graduellement, les deux thèses – « expérimentale » puis « théorique » – qui étaient traditionnellement menées par les étudiants des années soixante se transforment en une seule thèse d'État. ¹⁹³ Celle-ci est finalement supprimée en 1985 par la loi Savary qui instaure un doctorat plus court, plus « professionnalisant » [Renaut, 1995]. La durée de la thèse diminue tandis que sa taille augmente : de six à dix ans et quelques dizaines de pages (1950-1960) à quatre ans et deux cents pages vers 1980 puis trois ans et trois cents pages (1990-2000). Leur encadrement s'élargit. D'abord, parce que certains chercheurs, plus jeunes que les lieutenants, partent fonder de nouveaux laboratoires où ils peuvent à leur tour recruter des étudiants et diriger des thèses : Jean-Claude Gilles (1972), Livage (1974) et Revcolevschi (1977) quittent successivement le laboratoire Collongues pour fonder trois laboratoires (ESPCI, Paris 6, Orsay) [Teissier, 2006]. Jean-Claude Bernier quitte le laboratoire de Paul Poix à Orsay pour Strasbourg. À Bordeaux, les migrations colonisatrices commencent dès le début des années soixante (IV.4). En 1976, Rousset quitte les Pâris à Lyon pour un poste de professeur à Toulouse où il fonde l'année suivante le Laboratoire de chimie des matériaux inorganiques (LCMI). ¹⁹⁴ Deuxième raison : la structure familiale du laboratoire se remodèle en interne et le droit d'aînesse perd sa primauté. Lorsque la hiérarchie mandarinale disparaît, peut s'ensuivre une période sans repère, durant laquelle les relations humaines tout en étant moins

¹⁹¹ « J'ai pris un premier élève, Christian Cros, auquel j'ai proposé un sujet proche du mien [...] C'était mon premier élève mais il n'avait que quatre ans de moins que moi. » [I Pouchard, 2004, p. 3]. « Au laboratoire, il y avait beaucoup de « colonels », c'était structuré comme ça, un jeune ne dirigeait pas une thèse si un plus âgé pouvait la diriger. Ce n'était pas chacun son tour. [...] Mlle Théry par exemple a passé sa thèse en 1962, et m'a encadré pour ma thèse en 1964 quand je suis entrée au laboratoire, c'est-à-dire deux ans après sa propre thèse. À l'époque, il y avait trois ou quatre dames autour de M. Collongues et beaucoup d'entrants, elles étaient toutes jeunes et avaient toutes leurs étudiants, thésards ou DEA. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 10].

¹⁹² « j'ai passé ma thèse en 1970, j'ai dû commencer à co-encadrer une thèse en 1986, c'est-à-dire seize ans après avoir soutenu ma thèse, que j'avais passée assez jeune, mais quand même. [...] C'est embêtant pour la carrière, car on n'a aucune lisibilité à l'extérieur, mais je n'étais pas d'une ambition démesurée [...] J'ai passé beaucoup de temps à expliquer : j'ai toujours eu beaucoup de relations avec les étudiants, parce qu'à un moment ou un autre, ils me passaient dans les mains. À partir de 1987, j'ai quand même co-encadré des thèses. [...] C'est aussi parce que j'étais comme ça et que je ne réclamais pas. Mes compétences faisaient que j'étais plutôt dans une position transversale. Ensuite, j'ai plutôt co-encadré parce que justement je ne sais pas tout, en optique par exemple. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 10] Anne-Marie Lejus « était une des femmes, disons, les plus dévouées, qui était prête à se donner beaucoup de mal pour la communauté. Elle s'occupait beaucoup de ses thésards. Comme toute les autres femmes du labo elle était plus proche d'eux et plus maternante. » [I Serreau, 2004, p. 7].

¹⁹³ « PT : Et pourquoi un deuxième sujet de thèse ? – MT : C'était la tradition : il y avait un sujet expérimental qui correspondait à cinq ou six années de travail expérimental puis après, un sujet purement théorique qui devait montrer l'aptitude du thésard à rédiger quelque chose de cohérent et qui se situait aux frontières de la science à l'époque. Le deuxième sujet est un pur travail de compilation, d'assimilation qui se fait en six mois, un an. » [I Tournoux, 2006, p. 3]

¹⁹⁴ « J'ai été nommé Professeur à Toulouse en 1976 à l'Université Paul Sabatier (UPS). Je n'avais personne; je suis parti de zéro quand j'ai créé le laboratoire [...] C'était en 1977-78 et je l'ai appelé Laboratoire de Chimie des Matériaux Inorganiques (LCMI). » [I Rousset, 2006, p. 3].

hiérarchiques sont beaucoup plus agressives, moins « bon enfant » qu'auparavant.¹⁹⁵ Une organisation non hiérarchique fonctionne-t-elle forcément moins bien ? Une auto-organisation serait-elle viable et efficace en recherche universitaire ? Question ouverte. Quoiqu'il en soit plus de chercheurs ont désormais le droit d'encadrer des doctorants. Ce faisant, une lutte pour les étudiants s'engage entre chercheurs confirmés. Quand la structure hiérarchique multiplie les centres de pouvoir, la compétition augmente horizontalement : d'une opposition marquée entre générations, on passe à une rivalité transversale entre groupes ou individus de même niveau. Même si la rivalité entre laboratoires continue d'être structurante, au sein même d'un laboratoire, chacun a tendance à se protéger, à cloisonner son pré carré. Les relations entre collègues, voire même entre thésards, peuvent alors être plus tendues, l'ambiance d'un laboratoire se dégrader sous l'effet d'une concurrence accrue, d'un jeu trop « personnel ». Individualisme culturel, inquiétude prospective ou comportements idiosyncrasiques ? La tendance semble générale.¹⁹⁶

Une autre question soulevée par la crise culturelle des années 1960 est l'environnement. Comment le souci écologique se traduit-il au laboratoire ? La chimie douce a parfois été présentée comme une réponse (VI.1.2.2) à une chimie sale mais la réduction énergétique qu'elle induit nécessite un recours aux solvants organiques, souvent polluants. Les recherches sur l'énergie des années 1970, présentées aujourd'hui comme environnementales, répondaient plus à une souci d'indépendance des pays du Nord qu'à une volonté écologique. Dans les laboratoires de recherche, peu d'efforts sont entrepris pour remplacer les éléments lourds, souvent toxiques et polluants, par des éléments moins nocifs. Aucun témoin ne les mentionne au cours de ces années-là. Ce n'est que récemment, à partir

¹⁹⁵ « Le mandarinat créait des liens. [...] maintenant] les habitudes ont changé : les gens contestent, quand ils ne sont pas d'accord, ils ouvrent la porte et disent : « je ne suis pas d'accord », ou presque. Ca ne va pas être facile. – *PT* : *C'est plus démocratique.* – [...] Dans l'École [ENSCP], il y a des laboratoires où ils ne s'entendent pas du tout, c'est triste et à l'encontre du bon fonctionnement d'un laboratoire. Pour nous, ça n'a jamais été le cas, bien sûr il y a des différents. Je pense que les labos Rouxel, Lucas, Mme Antony, Hagenmuller tournaient bien parce qu'il y avait une hiérarchie, des habitudes et pas trop de contestation. – *PT* : *Vous pensez que c'est un bien pour le laboratoire ?* – *DS* : Ca dépend des patrons. Si c'est vraiment, un homme brillant et efficace, très bien. Si ce sont des gens comme Boch qui sont trop à l'extérieur, qui ne s'occupent guère de leur laboratoire, celui-ci périclité. Mais je dirais qu'en médecine, c'est pareil, l'impression que j'ai dans les hôpitaux, c'est que les services qui fonctionnent bien, sont ceux avec un patron qui sait ce qu'il veut, qui sait déléguer [...] Je me souviens qu'en 78, quand je suis arrivée, il y avait des étudiants micro-thésards de 3^e année de l'École de Chimie et qui voulaient tout casser, et puis ils se rendaient compte que ça n'allait pas, ils se mettaient alors au goût du laboratoire, devenaient gentils, serviables, et tout le monde fonctionnait comme cela. J'étais vraiment étonnée de voir que ceux qui arrivaient se pliaient aux méthodes des plus anciens, dans l'aspect positif. [...] récemment, j'ai assisté à un pot de thèse où il manquait du pain, personne ne s'est proposé pour aller à la boulangerie, avant, n'importe qui l'aurait fait. C'était une ambiance beaucoup plus bon enfant je dirais. » » [I Serreau, 2004, p. 13-14].

¹⁹⁶ « Maintenant, les jeunes, entre trente et quarante ans, qui entrent dans un laboratoire, veulent avoir très vite leurs sujets, leurs sous, leurs contrats, leurs thésards : « leur », entendez possessif. C'est une ambition tout à fait respectable mais ce n'est pas toujours très agréable dans la vie quotidienne. [...] Soit il y a douze thésards avec un seul chef, soit c'est très cloisonné, et je trouve que c'est en train de se cloisonner de plus en plus. Pas spécialement en chimie du solide; c'est peut-être à cause du contexte, ils sont plus anxieux car ils ne savent pas comment ça va se passer pour eux. Ils ont envie d'avancer dans la carrière, ils veulent tous devenir directeur de laboratoire, je ne sais pas mais ça les rend plus agressifs, plus personnels. C'est comme dans une équipe de football : il y en a qui jouent personnel. Je trouve que c'est plus fréquent qu'avant. [...] C'est peut-être dû aussi à des personnalités. Il y a des gens qui sont comme ça, et qui auraient agi ainsi à n'importe quelle époque. C'est peut-être parce que je vieilliss mais j'ai l'impression que ce n'était pas comme ça avant. Je dirais dans les années quatre-vingt dix. [...] le clivage c'était plutôt les jeunes contre les vieux, les jeunes s'aident, se soutiennent, font action commune. Maintenant, ça se tire plutôt dessus entre thésards. C'est un truc que je n'ai jamais connu. L'ambition, c'est très bien mais je pense qu'il y a une vie en dehors de la recherche et des laboratoires. Peut-être qu'à l'époque, les patrons justement étaient distants, et que par la force des choses, on se retrouvait entre nous. Ce n'est pas propre à ce laboratoire, qui reste un endroit très agréable à vivre. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 10].

des années 1990 et plus encore 2000, que la chimie industrielle veut racheter son image auprès des opinions publiques par des comportements plus respectueux de l'environnement. Le « développement durable » constitue ainsi l'une des dernières modes dont se réclame l'industrie, en particulier l'industrie des matériaux.¹⁹⁷ Au delà de la rhétorique facile et des effets d'annonce, l'intérêt économique pèse encore très lourd face aux questions écologiques. Rhodia par exemple, qui veut convaincre de son attachement à l'écologie, continue de produire et de vendre des terres rares qui sont des éléments lourds, très toxiques, même si elle essaie diminuer leur utilisation. De leur côté, les consommateurs renoncent rarement à un bien-être, fût-il polluant, alors même qu'ils défendent l'écologie en tant que citoyen responsable. Les universitaires quant à eux, sous prétexte qu'ils travaillent sur de petites quantités, ont fait peu d'effort jusqu'aux années 1990 pour s'affranchir des éléments nocifs, dangereux ou polluants. Ils ne pensent pas alors qu'en cas de commercialisation la toxicité du matériau pourrait poser un problème crucial, voire rédhibitoire.¹⁹⁸ Les efforts de la chimie universitaire en faveur de l'environnement sont très récents, au début des années 2000. Aujourd'hui, plus nombreux sont les thèmes de recherche qui s'orientent vers les questions écologiques. Il s'agit désormais de faire une « chimie propre ».¹⁹⁹ Cinquante ans d'histoire ont modifié le point de vue : en 1950, une chimie « propre » désignait une manipulation bien faite ! Il n'est pas très étonnant que les jeunes générations soient plus sensibilisés à un problème contemporain que certains chimistes de la vieille école.

¹⁹⁷ « Rhodia et la plupart de ses collègues industriels sont très préoccupés par le développement durable. Chez Rhodia, on a un directeur du développement durable membre du Comité exécutif, membre du *board* et il a donc un impact au plus haut niveau de la société. C'est pas uniquement pour avoir quelqu'un, c'est aussi parce qu'il y a des indicateurs de développement durable. On ne travaillerait certainement plus sur CrO₂ aujourd'hui, c'est un produit qui a eu sa période de gloire et qui, je pense, n'est plus utilisé. S'il fallait l'utiliser maintenant, on ne pourrait plus parce qu'on parlait de Cr^{VI}, même pour le Cr^{IV}, on ne sait pas quel est son devenir. Que se passe-t-il quand on brûle la cassette de polymère qui le contient ? On ne sait pas. [...] *PT* : *Chez Rhodia, ça fait combien de temps ?* – *PM* : Dès la création de Rhodia ce fut l'un des axes clairs, du temps de Rhône-Poulenc, on s'en préoccupait mais peut-être un peu moins, je dirais que ça fait dix ans. Pour le dire autrement, depuis que je suis chez Rhône-Poulenc, on a toujours eu une stratégie d'industriel responsable. Quand je suis entré ici en 1980, il y avait déjà un comité d'hygiène et sécurité important, on ne faisait pas n'importe quoi, ni dans les laboratoires, ni dans les usines. Depuis dix ans, l'effort s'est intensifié vers le développement durable. » [I Maestro, 2007, p. 11].

¹⁹⁸ « *PT* : *Sur ces questions, vous dites que les industriels ont été en avance sur les laboratoires de recherche ?* – *PM* : Les laboratoires s'en préoccupent de plus en plus. Ils auraient pu être précurseurs et ils sont en retard. [...] Maintenant, c'est à la mode, le CNRS a même créé un département du développement durable. L'activité est clairement identifiée, ça va venir. Jusqu'à présent les laboratoires ne s'y intéressent pas. Je prends un seul exemple entre la chimie du solide et la physique. On parle beaucoup de puits quantiques, fabriqués avec de petites particules, en diminuant la taille des particules, vous modifiez leurs propriétés électroniques. Les principales molécules utilisées sont des sulfures de cadmium – ceux-là même que nous utilisions comme pigments – dopés par du sélénium, du mercure, du tellure... c'est-à-dire des éléments qui peuvent avoir une toxicité avérée. Je vois beaucoup de laboratoires académiques qui travaillent sur ces *quantum dots* dans des conditions de dangerosité importante. Même s'ils arrivaient à mettre en place ces produits avec des propriétés, ils ne trouveraient aucun industriel pour travailler sur des sulfures de cadmium. Il y a beaucoup d'autres exemples avec des problèmes d'environnement. [...] cadmium, thallium... ne sont plus utilisés par les industriels alors que les universitaires ne s'en privent pas. » [I Maestro, 2007, p. 10-13].

¹⁹⁹ « Une des autres motivations des chimistes est de faire de la chimie propre, de la chimie sans pollution – loin de la mauvaise réputation des industries pétrolières –. L'objectif est clair, il s'agit de faire des matériaux qui ne sont pas polluants, même après leur cycle de vie. Des exemples : d'abord, la conversion d'énergie, trouver des matériaux qui sont utilisés pour les énergies alternatives, les électrodes de batterie, une équipe fait ça avec un industriel, Bolloré, pour la conversion d'énergie solaire, des matériaux photovoltaïques, des photopiles ; deuxièmement, il y a un groupe qui fait des pigments, tout ce qui va colorer les matériaux d'utilisation courante, par exemple dans les plastiques alimentaires. L'industrie chimique a longtemps utilisé des terres rares pour faire des couleurs qui sont polluantes pour l'environnement. On essaie de faire des pigments complètement recyclables. Ce groupe travaille aussi sur des céramiques pour stocker les déchets nucléaires, pour éviter les fissurations pour un stockage sûr. Cette volonté de non-pollution est une grosse évolution depuis cinquante ans. » [I Lefrant, 2006, p. 1].

Si la toxicité chimique se pose pour un environnement dilué, elle est d'autant plus cruciale dans un environnement confiné. La dernière évolution que je voudrais évoquer ici est la sécurité et la santé au laboratoire. À grands traits à nouveau, on peut dire qu'en matière de sécurité la loi est passée d'un laxisme inconscient, voire coupable, à une réglementation tatillonne, voire absurde. Vers 1970, c'est sans complexe que l'on fume dans un laboratoire de chimie, à côté d'une bombonne de gaz ! (photographie ci-dessous).



L'évolution des conditions est plus marquée dans l'industrie privée, qui se dote de « comité hygiène et sécurité » et fait appliquer les règles de sécurité en usine et dans ses centres de recherche.²⁰⁰ Une fois encore, l'Université a du mal à suivre pour des raisons idéologiques (respect du libre-arbitre) et de moyens mis à sa disposition. Mais l'État gendarme se montre moins pointilleux pour rénover des locaux dont il a la charge (financière) que pour faire appliquer la loi ailleurs. Les médias dénoncent aussi plus aisément les incidents dans l'industrie chimique que dans les organismes d'État (mis à part le nucléaire). Les laboratoires implantés dans de vieilles institutions – comme les écoles d'ingénieurs ou les universités en ville –, aux locaux exigus, constituent une menace (réelle et fantasmagorique) pour leurs voisins mais surtout pour eux-mêmes. Invité au comité d'évaluation d'un laboratoire de renommée internationale, un industriel propose en fin de réunion avec humour et bon sens de le fermer parce que les conditions de sécurité y sont déplorables.²⁰¹ Combien

²⁰⁰ « depuis que je suis chez Rhône-Poulenc, on a toujours eu une stratégie d'industriel responsable. Quand je suis entré ici en 1980, il y avait déjà un comité d'hygiène et sécurité important, on ne faisait pas n'importe quoi, ni dans les laboratoires, ni dans les usines. » [I Maestro, 2007, p. 11].

²⁰¹ « Certaines conditions de travail dans certains laboratoires universitaires sont inadmissibles. De temps en temps, on m'invite à participer à l'évaluation de laboratoires du CNRS et l'année dernière, je suis allé à celle d'un laboratoire de renommée internationale, totalement justifiée. À la fin, quand les auditeurs ont donné leurs conclusions, tout le monde a dit que les résultats étaient excellents – ce qui est vrai – et moi j'ai dit qu'il fallait le fermer, ce laboratoire ! Tout le monde m'a regardé, pourquoi tu dis ça, etc. Les conditions de travail sont inacceptables, un jour il y aura un accident, les thésards sont à côté de leurs montages expérimentaux, ils n'ont pas de bureau, pas de place parce qu'ils n'ont pas d'argent alors qu'on en donne parfois beaucoup à d'autres instituts, dont l'impact sur la recherche est moindre. » [I Maestro, 2007, p. 11].

de riverains des écoles d'ingénieurs parisiennes se sont affolés à cause d'émanations gazeuses à la sortie des hautes aspirantes (quand elles fonctionnent) ! Parfois, un accident mortel survient comme à l'École nationale supérieure de chimie de Mulhouse en mars 2006.²⁰²

Tant bien que mal, les laboratoires universitaires ont essayé de parvenir à des conditions de sécurité suffisante pour fonctionner. Des pays comme l'Allemagne ont pu servir de modèle en matière de sécurité.²⁰³ La normalisation des conditions de travail est censée assurer une meilleure sécurité. Même après renforcement des règles de sécurité, les risques d'accident existent toujours, la recherche étant imprévisible par définition. Certains anciens thésards rappellent les conditions dangereuses dans lesquelles ils travaillaient durant leur thèse. Des accidents se sont produits. Hagenmuller lui-même a été blessé au laboratoire Chrétien perdant des phalanges ; un autre thésard travaillant sur les perchlorates de lithium a perdu la vue lors d'une explosion. Les risques sont bien réels. Les thèses de Pouchard et d'Antic-Fidancev peuvent donner une idée de conditions dangereuses. Au début des années 1960, Hagenmuller confie à l'un de ses étudiants les plus doués, Pouchard, un sujet de thèse original mais difficile et dangereux parce qu'il porte sur les « silanes », des composés du silicium (SiH_4) qui explosent à l'air. Même si le patron est très attentif aux travaux du jeune thésard, celui-ci piétine et les explosions se succèdent « tous les huit jours ». Après deux ans d'effort et deux laboratoires détruits, Pouchard arrête ce premier sujet et se réoriente vers le sujet phare du laboratoire : les bronzes de vanadium (IV.4.1.4). Le pire est évité. Au milieu des années 1960, Trombe lance l'une des jeunes thésardes du Laboratoire, Elisabeth Fidancev, sur « l'étude du comportement du lanthane dans les plasmas d'arc électrique ». Les plasmas sont à la limite des connaissances du LTR et la jeune fille, qui se trouve rapidement seule, poursuit le travail jusqu'au jour où elle fait un malaise au cours d'une expérience. Alerté le patron prend alors conscience du danger : l'arc électrique rejette du monoxyde de carbone, gaz mortel. La jeune fille change elle aussi de sujet.²⁰⁴ Dans les deux cas, il est frappant de voir que le thésard travaille à la limite du savoir-faire de son laboratoire. Si le deuxième cas se révèle dangereux à l'usage, le premier cas est réputé dangereux dès le départ. Certains sujets

²⁰² « D'après l'état des lieux faisant suite à l'explosion de l'École nationale supérieure de chimie de Mulhouse le 24 mars dernier, et selon les premières hypothèses, de l'éthylène serait en cause. Le procureur a cependant estimé prématuré de déclarer la fuite de la bonbonne de gaz incriminée comme origine de l'accident et une enquête de la police judiciaire est en cours. On déplore la mort de d'un enseignant de 41 ans, Dominique Burget, une lycéenne de 18 ans grièvement blessée qui se remet actuellement et une douzaine de blessés légers. L'incendie qui a suivi a été rapidement contrôlé et le juge d'instruction Ariane Combarel a été saisie par le parquet « homicide involontaire et blessures involontaires ». » (*L'Actualité chimique*, mai 2006, p. 57).

²⁰³ « D'ailleurs notre voyage en Allemagne [1960] nous a appris beaucoup de choses au niveau des manipulations dans les laboratoires et de la sécurité en particulier. On manipulait allègrement le mercure alors qu'en Allemagne, il y avait des consignes de sécurité très strictes (rire). [I Tournoux, 2006, p. 4]

²⁰⁴ « Il n'y a qu'avec Pouchard qu'il [Hagenmuller] travaillait à la paillasse parce qu'il l'avait mis sur un sujet de thèse absolument impossible, des composés du silicium, les silanes qui explosaient tous les huit jours avec un appareillage en verre extrêmement complexe. C'était affolant, Hagenmuller et Pouchard venaient la nuit surveiller les manipulations. » [I Tournoux, 2006, p. 4]. « si le méthane est assez sage, le silane explose à l'air. D'une part, c'était dangereux, d'autre part, c'était très difficile à réaliser. J'ai commencé une thèse difficile où j'ai autant déployé des talents de verrier – car à chaque explosion les appareils étaient détruits – que de chimiste. [p. 2 ...] En 1963, j'avais déjà détruit deux petits laboratoires à Bordeaux à cause des explosions de mes silanes, j'étais passé à côté du danger, j'avais eu beaucoup de chance, c'était l'année où je m'étais marié. Je me suis dit que je ne pouvais pas poursuivre ainsi. [...] j'ai décidé de changer de sujet de thèse. » [I Pouchard, 2004, p. 8]. « En 1965 [...] j'ai commencé ma thèse : elle portait sur l'étude du comportement du lanthane dans les plasmas d'arc électrique. Même si c'était dans le groupe de Blandin, j'étais toute seule sur ce type de sujet au laboratoire. Ça n'avancait pas tellement bien : on cherchait à améliorer les performances dans les plasmas, c'était toute une technologie à importer sur les arcs intensifs, je n'étais pas tellement aidée. À un moment donné, j'ai fait un malaise, je ne me trouvais vraiment pas bien, Trombe est venu voir et on a stoppé. Il n'y avait pas de protection pour l'arc intensif au laboratoire, du monoxyde de carbone se formait dans la pièce. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 1].

en effet, comme le « stockage d'énergie », sont dangereux²⁰⁵ et quelles que soient les mesures prises, le « risque zéro » n'existe pas. Même s'il n'y a pas lieu d'exagérer, un laboratoire de chimie peut être dangereux.

Tous ne sont pas exposés de la même façon. Comme ils sont à la pointe d'un sujet, les thésards et les jeunes chercheurs sont très exposés aux événements imprévisibles, aux conditions expérimentales qui sont parfois dangereuses. On parle alors de conditions de sécurité. Ce qui est plus difficile à déceler est l'impact sur la santé des gens. Des conditions particulières de travail peuvent l'altérer lentement. On a beaucoup parlé de l'amiante de Jussieu dans les médias et son « désamiantage », en cours, devrait résoudre deux problèmes d'un coup : diminuer les risques liés à l'amiante d'abord et ensuite augmenter la place disponible (par transfert de Paris à la Halle aux farines au cours des années 2006-2007). Les personnes les plus exposées au laboratoire à ce type de danger à long terme ont été les permanents et, parmi eux, certains techniciens. Les factotums des laboratoires ont longtemps travaillé dans des conditions déplorables favorisant, suivant les cas, contacts avec les solvants, avec le mercure sans protection particulière, avec des matériaux à base d'amiante ou de graphite pour construire les fours, avec les rayons X échappés de tubes peu étanches. Les témoignages font défaut parce que les maladies professionnelles sont souvent taboues et on ne prononce qu'à demi mots de terribles secrets. On ne "doit" pas trop en parler, encore moins en faire la publicité. Mon rôle ici n'est pas de fustiger tel ou tel laboratoire mais de rappeler que l'omerta n'est pas propice à un récit pluraliste. Difficile en l'absence d'étude statistique d'être catégorique, de prouver que l'activité professionnelle porte une responsabilité en cas de morts prématurées dès la quarantaine, voire, dans des cas rarissimes, de suicides de jeunes gens. Les maladies professionnelles restent larvées et leurs analyses rarement voulues par les pouvoirs publics. En cela, le laboratoire n'est pas différent d'autres lieux de travail, sources de « violence » et de « mort » [Thébaud-Mony, 2007]. Nombreux sont convaincus néanmoins, qu'ils le disent publiquement ou en intimité, que le laboratoire fut par le passé pathogène, qu'il a déclenché des « maladies professionnelles » graves ou mortelles pour certains de ses membres qu'ils soient techniciens ou chercheurs.²⁰⁶

VI.3.1.2. L'épineuse question des successions mandarinales

Les années 1970, 1980 voient l'autorité unilatérale des directeurs faiblir au sein des laboratoires. Bientôt se pose la question de leur succession soit parce qu'ils atteignent la limite d'âge – soixante-dix ans –, soit parce qu'ils sont écartés par la « règle des douze ans ». Instituée par le gouvernement socialiste après 1981, la « règle des douze ans » fixe à trois le nombre maximal de mandats (d'une durée de quatre ans chacun) que peut exercer un directeur de laboratoire (associé ou propre) lié au CNRS. Cette réglementation qui se veut équitable n'en demeure pas moins abrupte et conduit à une situation inédite. Comment assurer, dans les meilleures conditions, la succession de directeurs-fondateurs qui ont exercé le pouvoir pendant près de trente ans ? Vaste question, problème ardu, épine dans le pied du CNRS qui ne trouve de solutions que locales, consensuelles ou conflictuelles, mais toujours au cas par

²⁰⁵ « PT : Mais on est conscient du danger quand on travaille sur des sujets délicats ? – MT : On sait qu'il y a des risques. Quand vous travaillez sur le stockage chimique de l'énergie, vous mettez énormément d'énergie dans des petites capsules, vous assemblez le réducteur le plus énergétique avec l'oxyde le plus énergétique ! Il faut essayer de faire ça dans des conditions fiables. » [I Tournoux, 2006, p. 14].

²⁰⁶ « Dans les appareils, l'étanchéité n'était pas toujours assurée, il y avait des fuites de rayons X, je suis persuadé qu'il y a eu des maladies professionnelles liées à des fuites de rayonnement. – PT : La sécurité n'était pas un impératif dans les laboratoires ? – MT : Si, on faisait quand même attention mais on n'avait pas vraiment conscience de tout. Il fallait d'abord faire avancer les choses. » [I Tournoux, 2006, p. 4].

cas. Plus facile en effet de créer un laboratoire de toute pièce que de trouver un successeur à des personnalités ayant l'envergure sociale de Hagenmuller ou scientifique de Rouxel.²⁰⁷ Probablement chaque passation de pouvoir a donné un cas de figure spécifique. Je n'évoquerai ici que trois exemples très différents les uns des autres : Trombe entre (1969-1977), Hagenmuller en 1986 et Collongues (1988-1993).

Né en mars 1906, Trombe est le premier à être touché par la limite d'âge et quitte ses fonctions de directeur de recherche du CNRS en avril 1976 et par la même occasion la direction du Laboratoire de l'énergie solaire à Odeillo (LES) (V.2.2.2). En mars 1969 il avait déjà laissé de son plein gré la direction du Laboratoire des terres rares (LTR) pour se concentrer sur l'énergie solaire [RA LTR, 1970, p. 1]. C'est de sa succession au LTR qu'il s'agit ici. Le patron a choisi parmi ses plus anciens lieutenants pour lui succéder : Loriers (directeur) et Caro (sous-directeur). Membre du comité de direction du LTR jusqu'en 1972, Trombe a semble-t-il réussi sa succession. Cependant, une crise éclate en novembre 1976 au moment où se pose la question de la succession de Loriers. De vifs affrontements ont lieu entre les membres du Laboratoire. Dès le 18 décembre 1976, le Comité directeur du LTR recommandait « la division du Laboratoire propre en trois équipes de recherche [... ce qui a déclenché] brusquement une série de manifestations à Bellevue [...] Une vive agitation en résultait. » [Rapport Caro, 1977, p. 1]. De même la commission 11 – chimie des matériaux solides – « s'était nettement prononcée pour la séparation » [Rapport Caro, 1977, p. 3]. Le LTR est finalement démembré et disparaît en tant qu'unité CNRS en 1977, l'année suivant la retraite de Trombe, pour conduire à la formation de trois équipes propres de recherche, indépendantes les unes des autres.

Qu'est-ce qui peut expliquer la disparition d'un laboratoire aussi prestigieux et aussi efficace que celui des terres rares quelques mois seulement après le départ à la retraite de son fondateur, qui plus est l'un des chercheurs les plus gradés de la hiérarchie du CNRS ? Quatre niveaux de réponse peuvent être invoqués : individuel, thématique, financier, politique. Au milieu des années 1970, le Laboratoire des terres rares a grossi et abrite désormais environ soixante-dix membres (IV.2.3). Il est divisé en sept équipes de recherche, dirigées par les lieutenants de Trombe. La patron parti, d'abord de la direction puis du comité de direction, des rivalités anciennes ressurgissent soit entre « chefs d'équipe », soit entre « chercheurs confirmés » conduisant in fine à une ambiance délétère.²⁰⁸ La deuxième raison tient à l'extrême diversité des activités de recherche d'une équipe à l'autre : chimie métallurgique ou chimie du solide, couches minces ou monocristaux, oxydes ou métaux. Or, la chimie de l'état solide a fait long feu et l'idée d'un état solide continu s'est amenuisé au cours des années 1960 puis 1970, vaincue par l'émergence de la chimie du solide (chapitre III). Les hautes températures qui servaient de ciment entre les équipes a elle aussi cessé d'être une force autonome de la communauté (V.1.2.3). De plus, en 1972-1973, un groupe provenant du Laboratoire des hautes pressions de Bellevue et dirigée par la femme de Loriers (C. Loriers-Susse) rejoint le LTR [RA LTR, 1975, p. 2, 9], ce qui brouille un peu plus les cartes

²⁰⁷ « La question des successions est très difficile, la direction du CNRS ne trouve pas facilement de bons directeurs, il y a d'ailleurs à peu près autant de modes de gestion que de laboratoires. [...] Ce n'est pas la même chose de prendre la suite d'un directeur du gabarit de Jean Rouxel et de monter soi-même un laboratoire de toutes pièces. » [I Tournoux, 2006, p. 17].

²⁰⁸ « un certain climat de méfiance régnait entre chefs d'équipes rivaux, travaillant dans la même formation depuis quelquefois plus de 20 ans. [...] Une autre raison fondamentale, juxtaposée à la méfiance entre chefs d'équipe, étaient les profondes rivalités, dégénérant quelquefois en conflits personnels, entre les chercheurs confirmés du laboratoire appartenant à différentes équipes. » [Rapport Caro, 1977, p. 2-3]. « comme toujours, il y a eu des tensions entre les jeunes dont j'étais. On a fini par couper ce laboratoire en trois équipes de recherche » [I Caro, 2005, p. 13].

épistémologiques et relationnelles.²⁰⁹ Troisièmement, certains groupes sont tournés vers une recherche fondamentale, les autres vers une recherche plus appliquée. Il en résulte un déséquilibre financier : seuls quelques groupes obtiennent des contrats industriels : ceux de Loriers, d'Annick Percheron... Pour l'année 1970 par exemple, les contrats (hors CNRS) rapportent 115 000 francs (soit 110000 euros 2006), ce qui représente 18% du budget (hors salaire) du LTR. Ces crédits sont obtenus par la seule équipe Loriers [RA CNRS, 1970, p. 40], ce qui, probablement, exacerbe jalousies et tensions quant à l'utilisation de ces fonds. Les autres groupes – comme celui de Caro²¹⁰ – n'obtiennent pas de crédits industriels. Enfin, le quatrième niveau de réponse peut être recherché au niveau de la politique scientifique du CNRS. Après la mise en place des laboratoires associés (1966), les laboratoires propres deviennent moins intéressants pour la direction du CNRS : même s'ils constituent l'un des moyens de ses choix politiques, ils coûtent très cher au Centre et sont souvent considérés – parfois à tort – comme moins dynamiques parce que trop loin des universités.²¹¹ De fait, les membres du LTR craignent alors la remise en cause possible de leur statut de « laboratoire propre », qui avait assuré jusque-là sécurité de l'emploi, rapide promotion et moyens plus importants.²¹² En janvier 1977, face à tous ces problèmes la direction du CNRS diligente Caro, pressenti pour succéder à Loriers, pour réfléchir à une solution et lui demande d'écrire un *Rapport sur l'affaire du Laboratoire des terres rares*. Trois éventualités sont envisagées :

1. « reconstituer l'ancien laboratoire », ce que Caro exclut en raison des problèmes personnels qui ne sont pas résolus ;
2. « constituer un nouveau laboratoire propre » : l'auteur propose un « laboratoire mixte » associant le CNRS et un industriel, ici le CNET (laboratoire dirigé par François Auzel à Bagneux) autour de « l'axe spécifique terres rares » dans « la perspective d'une contribution aux connaissances fondamentales et à la technologie avancée sur le plan national ». Il envisage une discussion entre les principaux organismes intéressés par les terres rares : « CNRS, CNET, DRME, DGRST et les industriels (Thomson, CGE principalement) » ;
3. « une solution dans le cadre de Bellevue » : Caro propose la formation d'un laboratoire propre unique regroupant toutes les entités de Bellevue travaillant dans le domaine de « la physique des matériaux » et les « processus énergétiques propres aux matériaux ou à leurs surfaces » : quatre laboratoires propres

²⁰⁹ « Il en résultait une juxtaposition d'équipes ayant bien sûr entre elles des communications et des échanges, mais pratiquement jamais sur la stratégie de recherche » [Rapport Caro, 1977, p. 2]. « Loriers en dirigeait une [des trois équipes] qui s'était adjoint une équipe de haute pression qui n'avait pas grand chose à faire avec les terres rares mais qui était dirigée par sa femme. » [I Caro, 2005, p. 13].

²¹⁰ « PT : Vous parveniez aussi à collaborer avec des industriels ? – EA : On n'a jamais déposé de brevets. On n'a pas su faire de collaborations industrielles, Annick Percheron en a eu beaucoup sur les batteries mais pas nous. On ne savait pas faire. Peut-être qu'une fois on avait essayé avec Rhône-Poulenc : un DEA, je crois, avait été financé par ce contrat. » [I Antic-Fidancev, 2005, p. 6].

²¹¹ « PT : L'ensemble de Bellevue a fermé ou pas ? Comment ça se fait que vos laboratoires aient disparu ? – EA : Parce que c'est la politique du CNRS de fermer les laboratoires propres et les sites propres. Je ne pense qu'il y a beaucoup de sites propres du CNRS, ils ont commencé à rattacher les laboratoires à l'université puis ont créé les laboratoires mixtes. Dès 1964, à mon arrivée, on disait déjà que le CNRS voulait se débarrasser des laboratoires propres et il y arrive finalement. [...] PT : Comparativement, Bellevue avait du mal à recruter des étudiants, non ? – EA : Oui parce que la faculté gardait les étudiants pour elle-même, il y avait un antagonisme [...] C'est dommage parce qu'il faut plus d'ouvertures partout. » [I Antic-Fidancev, 2005, p. 4].

²¹² « le motif principal, sinon exclusif, d'inquiétude du personnel chercheur ou technicien devant l'éclatement du Laboratoire des Terres Rares était la perte du statut de Laboratoire propre. » [p. 6] « il est apparu que le principal problème se posait au niveau de ces derniers [ITA] qui souhaitaient vivement le maintien du Laboratoire propre en raison des avantages qui s'y attachent pour eux au niveau de la stabilité de l'emploi et la fréquence des promotions. Les avis des chercheurs étaient plus nuancés [...] mais quand même, l'idée que les moyens étaient plus importants dans un laboratoire propre les conduisaient à souhaiter le maintien d'une formation de ce type. » [Rapport Caro, 1977, p. 3].

(« physique des solides », « physique des matériaux », « magnétisme », « électrolyse ») et six équipes propres (dont les trois issues du LTR). Sa taille (129 chercheurs et 160 ITA) serait du même ordre de grandeur que les plus grosses unités propres du CNRS. Un directeur et un conseil scientifique pourraient superviser « trois départements » : « Surfaces et Interfaces », « Matériaux pour l'Énergie », « Terres Rares » [Rapport Caro, 1977, p. 1-9].

Visiblement, Caro croit beaucoup en cette troisième solution. Il en a déjà parlé lui-même au « directeur général » du CNRS et l'a soumise aux responsables de laboratoires de Bellevue et aux organisations syndicales. Le projet suscite de « vives » discussions et rencontre des « dirigeants [...] un peu méfiants, mais disposés à discuter sérieusement ». Caro voit là une chance incroyable pour « les études fondamentales dans le cas de la science des matériaux et des surfaces » pour lesquelles « il faut de plus en plus recourir à des instruments puissants permettant d'analyser chimiquement et structuralement la matière à l'échelle pratiquement des distances atomiques. » Il envisage aussi de coupler le laboratoire propre à des universités de la région parisienne. Le centre de recherche de Bellevue, qui « possède déjà plusieurs instruments (microscopes, sondes, analyseurs ioniques etc...) », pourrait ainsi devenir l'« un des premiers d'Europe pour les matériaux et interfaces ». L'achat d'« instruments "moyens" » devenus indispensables, comme le STEM d'un « coût moyen (1 million de francs) » (soit 510000 euros 2006), serait ainsi facilité et leur emploi accessible à l'ensemble des chercheurs de Bellevue [Rapport Caro, 1977, p. 9]. Pourtant, son projet n'est pas adopté, les trois équipes issues du LTR fondé par Trombe restent séparées – voire rivales –, le campus de Bellevue perd graduellement ses équipes avant de devenir à terme un simple centre administratif du CNRS.²¹³ La succession de Trombe s'est donc traduite par un essaimage et une fragmentation et non par une continuité géographique et épistémologique.

À Bordeaux, Hagenmuller cède la place en 1986 : il a atteint l'âge légal de la retraite (soixante-cinq ans) mais aurait pu poursuivre jusqu'à l'âge limite. Ce n'est pas de gaieté de cœur qu'il abandonne la direction du Laboratoire de chimie du solide (LCS) qu'il a fondé en 1974 mais parce qu'il y est contraint par la « règle des douze ans » instaurée au CNRS au début des années quatre-vingt.²¹⁴ Parce que, de Rennes à Nantes, il a régné sans partage pendant trente ans sur « son » laboratoire à qui il a donné sa vie, il le considère comme son enfant en quelque sorte et a le sentiment d'en être injustement chassé. Réflexe classique du mandarin en fin de carrière ? Quoiqu'il en soit, les récits sur sa succession ne concordent pas vraiment suivant la position des acteurs-témoins. Son premier choix se porte très probablement sur Pouchard avec qui il entretient alors – et toujours actuellement – une relation quasi-filiale et qu'il juge excellent scientifique. Pour des raisons personnelles de santé mais aussi parce qu'il préfère la science à l'administration, Pouchard décline l'offre.²¹⁵ Il

²¹³ « Bellevue va disparaître, il y a encore quelques restes parce qu'ils n'ont pas trouvé de place ailleurs ou qu'ils attendent que tout le monde parte à la retraite. Le centre de Bellevue va peut-être devenir simplement administratif. » [I Antic-Fidancev, 2005, p. 4].

²¹⁴ « Sous le mandat de Mitterrand, le CNRS a promulgué une loi qui interdisait aux directeurs de laboratoire du CNRS de rester plus de douze ans en place : c'est la règle des douze ans. En 1986, il y avait douze ans que je dirigeais le Laboratoire de Chimie du Solide. J'ai donc dû céder la place. » [I Hagenmuller, 2004, p. 5].

²¹⁵ « J'avais désigné mon successeur : Michel Pouchard, l'un de mes premiers élèves, qui était déjà avec moi, à Rennes, un chercheur remarquable avec beaucoup d'idées. A ce moment-là, il a eu des problèmes cardiaques et n'a pas voulu prendre la responsabilité du laboratoire. » [I Hagenmuller, 2004, p. 5]. « Hagenmuller a été obligé, par la loi des douze ans, de quitter la direction du laboratoire au premier janvier 1986. [...] Hagenmuller souhaitait (vous pouvez le lui demander) que je le remplace mais je ne voulais pas accepter pour deux raisons : d'abord j'avais des problèmes de santé assez graves (cardio-vasculaires), et puis j'aime la science mais je n'aime pas l'administration, l'organisation, cela ne m'intéresse pas. » [I Pouchard, 2004, p. 22].

s'agit alors de trouver un remplaçant, un nom revient souvent, Jean Étourneau, qui n'a alors que quarante-cinq ans. C'est probablement Hagenmuller qui propose une « direction collégiale » composée de quelques lieutenants de la première heure (dont Pouchard) dans laquelle il aurait encore un mot à dire. Aurait-il dans l'idée de diviser pour mieux régner ?

Encouragé par ses collègues selon sa propre version, poussé par une ambition personnelle selon d'autres, Étourneau accepte la direction officielle du Laboratoire de chimie du solide. Bientôt il désire se dégager de la tutelle trop encombrante de Hagenmuller. L'ombre du maître réduit trop sa « marge de manœuvre », entrave ses initiatives. La tension monte alors entre un nouveau directeur voulant se libérer de l'ancien, tuer le père en quelque sorte, et certains lieutenants (Pouchard en tête) qui ne comprennent pas ce désir (légitime ?) d'émancipation.²¹⁶ Jugé trop difficile à manœuvrer vu sa personnalité et sa carrure internationale, Hagenmuller est alors rapidement et tout à fait mis à l'écart par Étourneau. Le conflit est sanglant. Le divorce est consommé entre l'ancien et le nouveau directeur. Au sein du LCS, le groupe Pouchard subit des représailles : mis en quarantaine, il aura du mal à obtenir de la direction bourses de thèse, postes permanents, fonds propres. Pour pallier le manque de moyens et de personnels, Pouchard resserre ses relations avec Rhône-Poulenc : il en devient « consultant scientifique » à partir de 1987 [Pouchard, 2005] puis organise tant bien que mal, au centre d'Aubervilliers, un « groupe de recherche ».²¹⁷ Ainsi, autant Hagenmuller a réussi à construire un empire national connu internationalement autant il a été maladroit pour assurer sa succession au niveau local. En voulant garder la mainmise sur « son » laboratoire, il doit même renoncer au domaine qu'il s'était réservé : les « relations internationales ». D'un côté, le laboratoire y perd en renommée mondiale, de l'autre Hagenmuller perd sa position d'interlocuteur privilégié de la chimie du solide française.²¹⁸ De cet ostracisme, il conçoit un vif ressentiment. Pourtant il continue à venir régulièrement au Laboratoire, près de trois après-midi par semaine durant plus de vingt ans, et poursuit à travers le monde ses innombrables voyages – sans mandat il est vrai –. Le laboratoire ressemble à la passion d'une vie.

²¹⁶ Sur le déroulement des événements, je dispose de deux versions contradictoires, la première soutenue par Pouchard et Hagenmuller, la seconde par Étourneau. « Ceci m'amène à dire des choses un peu délicates mais il faut que je les dise car elles se sont passées ainsi. [...] Il a été remplacé à la tête du laboratoire par l'un de ses membres, Jean Étourneau. [...] Nous avons décidé d'aller vers une direction collégiale, Jean Étourneau serait le directeur, mais avec un conseil de cinq ou six anciens. Très vite, la situation a dégénéré, mes relations avec le directeur se sont détériorées, surtout lorsque le nouveau a voulu éliminer toute influence de l'ancien, alors que Hagenmuller était le fondateur du laboratoire et même de notre discipline. Je n'ai pas accepté. » [I Pouchard, 2004, p. 22]. « Un autre de mes élèves, Jean Étourneau a pris la succession mais il a essayé de m'écarter complètement de la direction : on appelle cela, le complexe du père, il avait des complexes par rapport à moi. » [I Hagenmuller, 2004, p. 5]. « En 1986, Hagenmuller a dû arrêter de diriger le laboratoire, il ne pouvait plus assurer ses fonctions. À 45 ans, je n'étais pas très chaud pour prendre sa suite : le laboratoire comportait 150 personnes à l'époque, je devrais mettre en sourdine mes activités scientifiques. Sous la pression de mes collègues, j'ai accepté mais c'est très difficile de prendre la succession d'un homme comme ça. Durant l'année 1985, j'ai beaucoup réfléchi. J'ai ensuite posé mes conditions : je ne voulais pas être un mandarin mais je ne voulais pas non plus rester l'ombre du commandeur ! Le directeur doit avoir une marge de manœuvre. J'ai fait le pari qu'on pouvait réussir. [...] Je ne voulais pas remplacer Hagenmuller – on ne remplace pas les gens – mais prendre sa succession. » [I Étourneau, 2005, p. 1-2].

²¹⁷ « Ceci explique pourquoi je n'ai pas eu le soutien que j'aurais pu légitimement attendre alors qu'à l'époque j'avais le groupe le plus important du laboratoire. J'ai essayé de compenser cela en créant un groupe de recherche chez Rhône Poulenc au laboratoire de recherches d'Aubervilliers mais en quelques années, on ne crée pas un groupe performant *ex nihilo*. Nous avons cependant obtenu des résultats intéressants dans le domaine des cobaltites. » [I Pouchard, 2004, p. 22].

²¹⁸ « J'aurais pu poursuivre les relations internationales pour le laboratoire mais je les ai continué à titre privé. C'est dommage car le laboratoire a perdu de son influence internationale. [...] je dirigeais par la science, mon successeur est un bon administrateur, ce n'était pas le meilleur scientifique du laboratoire. Il a quand même réussi parce que c'était un homme sérieux, organisé » [I Hagenmuller, 2004, p. 5, 8].

Troisième cas particulier : le Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide (LCAES). Les choses s'y passent beaucoup plus en « douceur ». Comme Trombe, Collongues attend l'âge limite – 70 ans – pour quitter la direction du laboratoire. En 1993 (il est né en 1924), il cède officiellement la place à son successeur après avoir préparé le terrain de longue date. Dès la fin des années soixante-dix, il semble acquis que Vivien prendra la relève. Pour Collongues, celui-ci cumule les avantages : excellent scientifique, formé sur des techniques spectroscopiques (RPE, RMN), très porteuses à partir des années 1980, ayant rapidement gravi les échelons de l'université, d'un caractère bon, modeste et respectueux envers les autres, un "saint" en quelque sorte. Collongues sait très bien qu'il ne cherchera pas à l'écartier et qu'avec lui, l'avenir scientifique du laboratoire est assuré.²¹⁹ Chacun y gagne. Dès 1988, cinq ans avant la date officielle, Collongues partage déjà la direction avec son dauphin. Leur entente est cordiale, efficace – l'un cherche les financements, l'autre s'occupe de l'administration – et une amitié sincère se développe entre les deux hommes.²²⁰ Vivien, au caractère plus doux, reçoit ainsi en héritage un terrain pacifié, préparé par Collongues, plus ferme, au cours des années soixante puis soixante-dix.²²¹ Au sein de l'unité mixte (UMR) associant le LCAES et le Laboratoire de chimie de la matière condensée (LCMC), Vivien se montre moins décidé, moins « agressif » que ne l'est Livage pour arracher les postes ou les bourses, moins porté sur la communication pour s'imposer dans l'arène médiatique de la science, moins arriviste aussi.²²² La modestie n'est sans doute pas la meilleure arme du scientifique.

La passation de pouvoir est tellement douce qu'on ne voit même pas bien qui aurait pu succéder à Collongues en dehors de Vivien. La plupart de ceux qui voulaient diriger un laboratoire sont déjà partis, n'espérant pas trop la succession : Gilles, Revcolevschi, Galtier... Ce qui surprend aussi, c'est que Vivien (comme Livage) n'a pas été formé par Collongues en thèse contrairement à Monique Perez y Jorba, Jeanine Théry ou Anne-Marie Lejus. Les lieutenantes de la première heure sont restées là, fidèles au poste auprès de celui qui reste le « patron ». Soit elles encadrent toujours efficacement les étudiants au laboratoire, soit elles

²¹⁹ « PT : *Et la passation de pouvoir entre Vivien et Collongues ?* – DS : Oh, ça s'est passé en douceur car jusqu'au bout Daniel Vivien n'a jamais voulu empiéter sur le territoire de Collongues. Il l'a toujours laissé décider, reconnu comme l'unique patron. – PT : *Depuis quand cette passation avait été décidée ?* – DS : Ça s'est fait assez vite, c'était plus ou moins en train de se faire quand je suis arrivée à la fin des années soixante-dix. [...] ça s'est bien passé entre eux. En fait je crois que ce qui a plu à Collongues en Vivien, c'est que c'était quelqu'un qui n'essayait pas d'écraser l'autre, de prendre sa place, et que scientifiquement, il avait des qualités qui plaisaient à Collongues. Donc c'était un successeur idéal : il savait qu'il ne le pousserait pas dehors et puis en même temps, c'était un brillant chercheur. [...] On ne fait jamais les choses gratuitement enfin si, peut-être Daniel Vivien. Lui, à mon avis, il porte une auréole, c'est un cas parmi tous ceux que j'ai connus. » [I Serreau, 2004, p. 13-14].

²²⁰ « Cinq ans avant sa retraite, il m'avait déjà laissé la direction de la recherche du laboratoire. De fait, c'est moi qui trouvais les financements, lui s'occupait de la partie administrative, signait les bons de commande que je rédigeais. Ce n'était pas un homme qui disait, c'est moi le chef. Il accompagnait les initiatives, quitte ensuite à faire des remarques qui étaient toujours judicieuses. En 1978, je suis devenu professeur deuxième classe, puis en 1988, professeur première classe. Enfin de 1993 à 2003, j'ai assuré la direction officielle du laboratoire. » [I Vivien, 2004, p. 18].

²²¹ « La personnalité de Collongues a instauré un équilibre fermeté - humanité. Daniel Vivien a été très aidé en prenant la succession de Collongues par le fait que le labo avait des règles de vie interne bien hiérarchisées avec des habitudes de respect du patron et cela a perduré. » [I Serreau, 2004, p. 13].

²²² « Vivien était aussi moins agressif que Livage, agressif dans le sens où il réclamait, argumentait, expliquait, et défendait un point de vue. [...] Ce que je veux dire par rapport à Livage, c'est que Vivien était au moins aussi bon scientifique que Livage (d'après l'avis du CNRS entre autres) mais n'était pas homme à se faire mousser, ou se faire de la publicité partout. La modestie n'est pas toujours bonne conseillère quels que soient les milieux, même scientifiques [...] Alors c'est admirable, mais je crois que grâce à Collongues [Vivien] a réussi à faire une carrière, à être reconnu sans faire de cinéma comme tous les autres pour se faire connaître. » [I Serreau, 2004, p. 13-14].

s'occupent avec abnégation de tâches administratives.²²³ Collongues pourtant ne pense pas à elles pour une éventuelle succession – qui aurait d'ailleurs très bien pu venir plus tôt –. L'auraient-elles même acceptée ? Il n'est sans doute pas facile pour lui de laisser la main avant l'âge légal, mais il semble plus facile de la laisser à quelqu'un qu'il n'a pas formé – qui ne serait pas tenté de tuer le père justement –, et, qui plus est, est un homme. On est quelquefois tenté de croire que « mieux valait encore à cette période être un homme » [I Serreau, 2004, p. 9].²²⁴ Pour être directeur de laboratoire, il faut avoir mené une carrière en ce sens, c'est-à-dire avoir poursuivi sa recherche scientifique sans s'être sacrifié pour le groupe. Or, les femmes du laboratoire ont plus été tentées de s'adonner à des tâches collectives, bénéfiques pour toute la « communauté », mais dont on ne voit pas l'effet en terme de promotion : serviables, travaillant d'une manière transversale – c'est-à-dire moins visible – plutôt que responsable, adonnées à des tâches administratives, peu reconnues. Quelle est la part de caractères individuels ? De conditionnement social ? Difficile de répondre à cette question mais probablement, même chez Collongues, il était aussi plus difficile d'être une femme qu'un homme.

Les exemples précédents offrent trois situations très différentes de passation de pouvoir d'un « mandarin » à ses successeurs : le premier conduit à un éclatement du laboratoire en plusieurs équipes, le second à une mise sur la touche de l'ancien patron, le troisième à une passation cordiale entre deux hommes d'âges différents, devenus amis. J'ai beaucoup insisté sur le caractère local de la succession. Cependant, il ne faut pas oublier que la tutelle du CNRS reste toujours présente dans le cas des laboratoires propres ou associés. On peut se demander par exemple pourquoi Collongues ou Étourneau n'ont pas été touchés par la « règle des douze ans », qui a fait abdiquer Hagenmuller. La règle serait-elle plus clémente pour certains ? Évidemment, sous couvert d'impartialité, la bureaucratie est aussi régie par des luttes humaines. Il est difficile de savoir quelle est la part du rapport de forces local/global dans la mesure où les tractations sont informelles et secrètes.²²⁵ Dans chacun des cas évoqués

²²³ « Madame Perez [...] s'occupait beaucoup des finances à l'époque. Monique Perez et Jeanine Théry sont les deux plus anciennes et au début, il y a eu un peu concurrence entre elles. La responsabilité financière demandait du dévouement dans la mesure où le temps de gestion financière était pris sur la recherche mais l'argent constituait quand même le nerf de la guerre et une forme de pouvoir. [...] C'était financièrement, du point de vue administratif, de la vie au jour le jour, qu'elles s'occupaient de tout, Monique Perez au CECM, Jeanine à l'ENSCP à partir seulement de 1975. J'irais même plus loin en disant que Jeanine a perdu – je ne dirais pas perdu – son temps : quand un chercheur accepte de faire du travail administratif, sa carrière peut en pâtir un peu. » [I Serreau, 2004, p. 6].

²²⁴ « Je ne vois pas qui d'autres aurait pu prendre le relais, en étant enseignant. » (p. 13). « *PT* : *Ce que je trouve étonnant, c'est que finalement les gens qui ont succédé à Collongues, ce ne sont pas ses élèves propres.* – *DS* : [...] Ah oui mais c'est difficile de laisser sa place. Il n'y en pas un qu'il a pris et qu'il a porté en disant : ce sera mon successeur. Pas parmi les anciens. Ensuite quand il est venu à l'École, les anciens étaient partis, quasiment tous : Revco, Gilles, Galtier... il n'y a que Jeanine Théry qui a suivi, Monique Perez est restée au CECM. – *PT* : *Il restait Anne-Marie Lejus pourtant ?* – *DS* : Oui, c'est vrai. [...] Revcolevschi, lui avait envie de diriger un laboratoire, il s'est rendu compte qu'il n'attendrait pas la succession de Collongues ou quelque chose comme ça donc il est parti. Ils en ont certainement discuté avec Collongues et Collongues a dû lui conseiller de saisir une éventuelle occasion. Jean-Claude Gilles, pareil. Par contre, il n'a rien proposé à Jeanine, mais c'est vrai qu'elle était chercheur, pas enseignante. – *PT* : *Pour devenir directeur de laboratoire, il fallait être enseignant chercheur ?* – *DS* : A l'époque, oui, il fallait être enseignant, pour Monique Perez, pareil. Mais enfin, je me souviens que Revcolevschi, au début, était aussi chargé de recherche au CNRS et cela ne l'a pas empêché de devenir professeur ensuite et directeur de laboratoire. Mieux valait encore à cette période être un homme. » [I Serreau, 2004, p. 7-8].

²²⁵ Collongues et Étourneau ont contourné la législation mise en place. Du fait de la composition des UMR, Collongues ne dirige plus l'unité CNRS durant les années quatre-vingt (c'est Livage) mais la direction du CNRS sait parfaitement qu'il dirige le LCAES (associé au CNRS) pendant vingt ans. Étourneau dirige le laboratoire de Bordeaux de 1986 à 2004 en changeant son intitulé en 1995. On peut saisir l'influence discrète de Fayard, soutien commun à Collongues et Étourneau. Directeur scientifique de la chimie à partir de 1984, Fayard est lié à

néanmoins, le mandarin en place est parvenu à faire accepter son dauphin même si celui-ci a parfois refusé – comme Pouchard ou Caro – de prendre la succession. C'est en cas de refus que les choses se sont compliquées par la suite.

En même temps que le départ à la retraite de la génération d'après-guerre s'opère une réorganisation des anciens laboratoires familiaux en de nouvelles structures dont les instituts de recherche constituent l'exemple le plus marquant.

VI.3.1.3. Trois stratégies d'adaptation organisationnelle (1980-2000).

À partir des années 1970, il devient crucial en chimie du solide de caractériser les composés de manière croisée en ayant recours à plusieurs instruments (VI.2.1). Certains appareils indispensables sont des « instruments mi-lourds » (cryogénie, microscopie) [I Friedel, 2001, p. 10] qui coûtent cher à l'achat et à l'entretien. À la fin des années soixante-dix, un microscope électronique coûte encore plus cher à l'achat que le budget annuel (hors salaire) d'un laboratoire propre de soixante-dix personnes, comme le LTR. D'autre part, modéliser est de plus en plus couru à partir des années 1980. Pour faire face à ce double défi, trois voies types ont été explorées.

Premièrement, conserver la structure familiale du laboratoire tout en collaborant avec des centres de compétences différentes : physiciens, théoriciens, industriels... C'est la solution qui a fait le succès de nombreux laboratoires de chimie du solide français au cours des années 1960, 1970. Elle correspond à la chimie du solide « conventionnelle » (chapitre IV) et a pu continuer jusqu'à aujourd'hui.

Une deuxième voie propose l'association d'une petite équipe de chimistes au sein d'un laboratoire de physique ou vice versa. L'idée de l'intime association n'est pas nouvelle : le Laboratoire de physique des solides d'Orsay a tenté l'expérience au début des années soixante.²²⁶ Elle est pourtant qualitativement différente parce qu'ici, malgré la prédominance numérique de l'une ou l'autre des cultures (physique ou chimie), chaque groupe conserve une relative marge de manœuvre. C'est ce qui a d'abord été tenté par Flahaut et Laruelle à la faculté de pharmacie (IV.1.2).

Je voudrais développer ici le cas du groupe Boilot à Palaiseau parce qu'il est paradigmatique d'un nouveau projet. Vers 1980, Jean-Pierre Boilot et Philippe Colomban, leur doctorat en poche, quittent le laboratoire Collongues à Paris pour rejoindre, à l'École polytechnique, le Laboratoire de physique de la matière condensée (LPMC), dirigé par un physicien ouvert à la chimie, Bernard Sapoval. Ils y fondent un groupe de recherche en chimie du solide, non pas asservi aux besoins des physiciens (comme au LPS), mais couplé à eux en tant que pairs. Pour preuve, les chimistes disposent d'une autonomie et continuent de collaborer avec d'autres laboratoires de physique du solide, comme celui d'Orsay, tout

Collongues (camarade de thèse et co-organise un colloque ensemble), il soutient Galy au moment de son ostracisme par Hagenmuller (« Mon vrai support était Fayard – et pas Collongues – dans cette période » [I Galy, 2005, p. 17]) et n'est pas aimé par Hagenmuller, qui dénonce un copinage : « vous savez la religion a été remplacée par des règles bureaucratiques. – PT : *Il était soutenu au CNRS alors ?* – PH : Le directeur de l'époque qui s'appelait Fayard était ravi de garder le même homme sans violer la loi des douze ans. Nous aimons en France les lois formelles mais souvent on répugne à les respecter quand il s'agit d'un copain. » [I Hagenmuller, 2004, p. 8].

²²⁶ Cette association n'a pas attendu les années 1980 pour être expérimentée. Ainsi, au cours des années 1960, le Laboratoire de physique des solides d'Orsay a recruté des chimistes pour qu'ils synthétisent de nouveaux composés à la demande mais l'objectif était plus une relation de service – d'après les chimistes – qu'une collaboration d'égal à égal (IV.4.3.).

proche. Les physiciens représentent encore aujourd'hui l'essentiel des effectifs – environ 80% – de l'unité mixte.²²⁷ L'avantage du couplage est important : l'implantation d'un petit groupe de chimistes au sein d'un laboratoire de physique favorise un contact étroit, quotidien, et stimule une créativité à l'interface des deux communautés, et ce, en laissant à chaque groupe une grande liberté d'action.

Le parcours thématique du groupe est alors plus varié que s'il était resté isolé des physiciens, et sans doute plus fécond. Partant des conducteurs ioniques en vogue dans les années 1970 – alumine bêta (IV.3.3) –, puis 1980 – « nasicons » –, le groupe de chimie du solide diversifie ses modes de synthèse des nasicons en adoptant les techniques sol-gel au milieu des années 1980. Il s'agit de passer des monocristaux de nasicons à leurs phases amorphes. Ces conducteurs ioniques amorphes inspirent le groupe qui oriente alors ses recherches vers les « verres organo-minéraux ». Ce glissement thématique, tout en permettant de réutiliser un savoir-faire antérieur, met en évidence une succession de modes : on passe d'une période superconducteur ionique à haute température, qui décline à partir de 1980 pour être abandonnée vers 1990 en France, à une période faste pour la chimie douce (1985-1995). À ces composés hybrides, le groupe Boilot associe un deuxième thème de recherche utilisant la technologie sol-gel pour fabriquer des « nano-particules ». C'est alors la mode « nano » qui envahit la chimie des matériaux. À la fin des années 1990, le thème des piles à combustible est remis au goût du jour lorsque Philippe Barboix, un troisième rejeton de l'école Collongues, rejoint le groupe Boilot et développe une approche haute température.

Même si au cours de la décennie 1990, les hautes températures ne constituent qu'un seul des trois thèmes de recherche, l'héritage de la chimie du solide « conventionnelle » n'en demeure pas moins présent dans la méthodologie. Les solidistes ont retenu plusieurs choses de Collongues : l'intérêt de réutiliser des savoir-faire antérieurs pour les appliquer par la suite ; la nécessité absolue pour un chimiste de s'appuyer sur une synthèse originale ; enfin l'effort à faire vers les caractérisations multiples – rendues possibles par l'association avec les physiciens ou les collaborations extérieures – dans une perspective d'applications.²²⁸ Un tel exemple montre comment la méthodologie de la chimie du solide traditionnelle conserve sa

²²⁷ « à l'École Polytechnique où je venais d'arriver pour monter une équipe de Chimie du solide formellement avec J.P. Boilot, mais qui était encore pour quelques années surtout à Limoges où il avait été nommé professeur dans la fournie du déménagement de l'École de Céramique [en 1979]. » [I Colomban, 2003, p. 2]. « C'est un travail qui se faisait à Polytechnique où je suis venu en 1981. C'est un sujet [les « nasicons »] qu'on a développé ici avec Colomban, toujours en liaison avec les physiciens du solide (Collin) d'Orsay dans le groupe de Robert Gomès qui avait pris la succession de Guinier. [...] Actuellement notre groupe de chimie du solide comprend 10 personnes et il est l'une des composantes de l'UMR-CNRS intitulée Laboratoire de Physique de la matière condensée qui comprend 50 personnes. » [I Boilot, 2000, p. 3].

²²⁸ « On a travaillé là-dessus [nasicons] de 1978 à 1984 mais toujours en parallèle avec l'alumine-β. [...] Après on a pris un virage vers les sols-gels. La transition s'est faite par le biais des nasicons. On avait dans l'idée d'élaborer des phases amorphes pour conducteurs ioniques. Elles étaient dérivées du nasicon. On a préparé les premiers verres organo-minéraux en s'inspirant des conducteurs ioniques type nasicons. Notre modèle à nous était le conducteurs ionique. Puis on a eu des résultats intéressants sur ces matériaux, sans rapport avec la conduction ionique. Ces hybrides organo-minéraux, à la frontière entre organique et minéral sont faits à température ambiante avec une chimie douce. [...] – *BBV: Qu'est-ce qui a motivé votre virage vers les verres ?* – Du point de vue industriel, l'alumine-β c'était moins motivant et, du point de vue fondamental, on avait fait le tour. De plus, je démarrais un groupe ici à Polytechnique, c'était le moment de passer à un nouveau projet. [...] Actuellement on est toujours sur la chimie douce. En plus des hybrides organo-minéraux, on travaille sur des objets nanométriques. On part de molécules et on essaie de construire des solides à partir de ces molécules. Ce sont essentiellement des matériaux pour l'optique : lasers ou stockage de l'information optique. [...] on a beaucoup de collaboration en physique. Notre troisième thème est la pile à combustible. Il est arrivé avec un ancien du laboratoire de Collongues : Philippe Barboix. Il travaillait sur les films minces de céramique et prépare maintenant des membranes conductrices ioniques pour les piles à combustibles. C'est donc un retour à la tradition d'origine. » [I Boilot, 2000, p. 3-4]. « Dans les années 90, il n'y avait plus de recherche en conducteurs ioniques en France. » [I Barboix, 2001, p. 2].

pertinence tout en adaptant les nouveaux impératifs de synthèse (comme la chimie douce ou les hybrides) et de caractérisation croisée (pour étudier les verres) aux trois piliers du dogme *solidiste* : structure, propriétés, applications.

Un contact plus étroit avec les physiciens a pu favoriser une plus grande diversité des sujets tout en produisant une belle chimie.²²⁹ Une telle organisation pose néanmoins deux questions importantes pour la gestion de la recherche. Quelle unité épistémologique de l'ensemble du laboratoire avec des groupes aux objectifs très variés ? Quelle répartition des financements industriels dans la mesure où les chimistes ont beaucoup plus de contrats industriels que les théoriciens ? À la deuxième question, certains industriels semblent vouloir donner aujourd'hui une réponse brutale, "l'argent doit aller aux groupes qui les honorent" en intensifiant leurs contrôles au sein des unités CNRS.

Une troisième solution vise à concentrer l'ensemble des compétences et des moyens nécessaires en chimie des solides au sein d'un seul laboratoire, énorme et multidisciplinaire : l'institut de recherche. L'idée n'est pas neuve puisque, dès les années 1960, aux États-Unis, d'immenses laboratoires interdisciplinaires ont réuni physiciens, chimistes et ingénieurs afin d'étudier les matériaux (III.4.3). Néanmoins, ces instituts se plaçaient résolument sous la conduite des physiciens. En France, l'idée d'instituts trace aussi son chemin. Lors de la « crise » du Laboratoire des terres rares (VI.3.1.2), Caro s'est battu dès mai 1977 pour que le campus CNRS de Bellevue soit transformé en un grand « Centre de Recherche spécialisé dans l'utilisation des instruments "moyens", qui pourrait devenir un des premiers d'Europe pour les matériaux et interfaces. » [Rapport Caro, 1977, p. 10]. Le projet n'avait pas abouti pourtant. Était-il trop gênant pour les intérêts personnels ? Caro avait-il eu une idée trop brillante ? Était-il trop « jaloux » localement pour que son projet aboutisse ? Ne fut-il pas assez convaincant au niveau du CNRS ?²³⁰ Le projet, en étant trop transversal, ne menaçait-il pas d'écraser dans l'œuf le tout nouveau découpage du CNRS en départements scientifiques opéré en 1976 ? Un peu de tout cela sans doute : le projet commun ne séduisait pas suffisamment pour fédérer des intérêts très disparates.

Une douzaine d'années plus tard, au tournant de 1990, l'idée a gagné en saveur : sortie de sous le manteau d'un *solidiste* du campus de Bellevue, elle a acquis une respectabilité institutionnelle au département de la chimie du CNRS. Paul Rigny, alors directeur de la chimie, écrit en 1990 que la « création de gros centres de caractérisation » aura comme double avantage d'« optimiser [l'] utilisation [des] équipements aussi coûteux » et de « réunir les

²²⁹ « Il faudrait peut-être plus parler de Jean-Pierre Boilot, le groupe de l'X est important, quand j'étais au comité de direction d'abord du laboratoire Sapoval qui est devenu le laboratoire Rosso, j'ai regardé de près cette équipe, Boilot a fait de la belle chimie et des beaux matériaux. C'est un gars très secret Boilot, introverti. » [I Tournoux, 2006, p. 12].

²³⁰ « J'ai retrouvé un projet d'un centre des matériaux à Bellevue, rédigé par Caro, avant les années 1980, mais les autres laboratoires de Bellevue n'ont pas voulu, c'est dommage, ils étaient tous contre lui. Il était vraiment en avance sur son temps, il avait des idées mais il était jalouxé. [...] Je ne comprends pas pourquoi le CNRS ne l'a pas soutenu. » [I Antic-Fidancev, 2005, p. 8]. En apparence au moins, il semble que le directeur général de l'époque, Pierre Jacquinot, n'ait pas été hostile au projet de Caro même s'il a tenu à « préciser les conditions qui lui paraissent nécessaires de réunir pour une telle opération, ce sont :

- 1) La Direction doit être assurée par une personnalité unique même si elle bénéficie de l'assistance d'un Conseil.
- 2) La formation doit comporter deux ou trois départements chacun avec son Comité de Direction.
- 3) Un équipement commun à toutes les équipes doit exister (c'est le cas de celui de l'ALB [Association des Laboratoires de Bellevue]).
- 4) Les chercheurs doivent prendre l'engagement d'une certaine mobilité entre équipes.
- 5) Un Conseil Scientifique aurait pour mission de définir des axes de recherche horizontaux » [Rapport Caro, 1977, p. 9].

Ces cinq conditions sont effectivement compatibles avec le projet de Caro – ou tout au moins a-t-il adapté son projet pour qu'elles le deviennent.

chimistes et leurs collègues des autres départements » [RA CNRS, 1990, p. 17]. Si l'on considère que le directeur du département joue un rôle de porte-parole de la communauté, l'institut de recherche constitue une solution consensuelle au début des années 1990. Il permet la mise en commun de coûts exorbitants (pour la caractérisation) et sous-tend une approche interdisciplinaire, devenue alors très à la mode en France.²³¹ Caro défendait la même idée à la fin des années 1970. Pour lui, l'institut constituait la meilleure solution « sur le plan purement scientifique » parce que, pour soutenir la comparaison au niveau international, les études en « physique des matériaux [...] et] processus énergétiques propres aux matériaux ou à leurs surfaces [...] doivent] de plus en plus recourir à des instruments puissants [...], très onéreux [que seul] un Laboratoire de Bellevue uni [...] peut prétendre acquérir » [Rapport Caro, 1977, p. 9-10]. L'institut de recherche résout l'inflation instrumentale en sciences expérimentales (VI.2.1), l'exigence cognitive sur-humaine pour couvrir la chaîne de la synthèse aux applications, tout permettant une économie d'échelle, indispensable en raison de la récession économique – celle des chocs pétroliers d'abord puis la fin de la guerre froide ensuite (au virage 1989-1991) –.

Les années 1990 voient donc fleurir les centres de recherche cherchant à concentrer au maximum des moyens financiers, des techniques instrumentales et des compétences humaines en un seul lieu géographique et une seule entité administrative. Le CNRS constitue le principal moteur de ces réorganisations locales en s'appuyant sur la politique de régionalisation de la France au début des années 1990.²³² Au niveau local, il y a compétition entre l'attrait que peut représenter une meilleure visibilité vis-à-vis de l'extérieur et la crainte de certains potentats de voir leur pouvoir diluer au sein d'une grosse structure. L'institut vise à croître pour être de plus en plus visible. La taille des locaux peut alors être un point critique lorsque la croissance institutionnelle est plus rapide que la croissance des surfaces disponibles. Il est donc crucial pour les responsables de l'institut (et du CNRS) de savoir estimer la taille des locaux nécessaires parce qu'un projet immobilier de grande envergure peut facilement durer une décennie (ce qui est aussi long qu'un mandat de douze ans).²³³ Le problème de taille et de croissance est sans doute le même pour les laboratoires – surtout dans les locaux étriés comme à Paris – mais à une échelle plus réduite.

Le label « institut » permet de repérer ces nouvelles entités en chimie des solides : Institut des matériaux de Nantes (IMN) créé par Rouxel en 1988 ; Institut de science et de génie des matériaux et procédés de Perpignan (IMP) dont Dupuy est le premier directeur (avant 1995) ; Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux (ICMCB), créé par Étourneau en 1995 ; Institut de réactivité, électrochimie et microporosité à Versailles (IREM), fondé par Férey (avant 2000), Institut de chimie de la matière condensée et des matériaux à

²³¹ Sur ce point, l'évolution de la chimie du solide est caractéristique d'un mouvement plus vaste qui touche l'ensemble des sciences physiques et biologiques. Rigny écrit que « ce type de collaboration, avec le Département mathématiques et physique de base, mais aussi avec le Département des sciences pour l'ingénieur, trouve son expression la plus poussée dans le programme *Ultimatech* : les chimistes ont besoin d'outils pour analyser et manipuler les molécules ou les atomes un par un ; les lasers à impulsions ultracourtes ouvrent une fenêtre sur la dynamique fine des réactions chimiques. » [RA CNRS, 1990, p. 17].

²³² « Deux opportunités se sont présentées à ce moment-là [début des années 1990] : 1° le CNRS voulait délocaliser la science en région, vers la province, en faisant une politique de décentralisation, 2° le plan du CNRS en région – soutenu par des personnes de droite et de gauche – visait à délocaliser pour regrouper les chercheurs dans des centres pluridisciplinaires. » [I Étourneau, 2005, p. 2].

²³³ « nous avons en ce moment un énorme problème qui entrave notre progression car nous ne pouvons plus accueillir ni personnels ni gros équipements. Il y a 10 ans, on était 40 à cet étage, aujourd'hui on est 85 ; on a un peu poussé les autres labos mais ça ne suffit pas. Il y a 10 ans exactement, j'ai lancé un projet de création de locaux. Un bâtiment nouveau a été programmé. Il a fallu quasiment 9 ans, c'est difficilement acceptable, entre le moment où on pense à un projet et le moment où il va se réaliser. La surface disponible est un facteur très contraignant, qui a gêné notre activité parce qu'on ne pouvait pas accueillir des équipes nouvelles ni accroître notre potentiel de matériels. » [I Rousset, 2006, p. 11].

Montpellier (ICMCM) dont Michel Ribes est le premier directeur en janvier 1999, un Institut de physique et chimie des matériaux à Strasbourg (IPCMS), dirigé par B. Carrière (1999-2004) (où travaillent Jean-Claude Bernier et Marc Drillon). D'autres laboratoires associent la même structure et les mêmes finalités qu'un institut sans que leur nom ne l'indique : Centre d'élaboration des matériaux et d'études structurales à Toulouse (CEMES), dont Galy est le premier directeur en 1988 ; Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux de Toulouse (CIRIMAT) dirigé par Rousset (1998-2004) ; Cristallographie et sciences des matériaux à Caen (CRISMAT), fondé par Raveau ; le Laboratoire des matériaux et procédés membranaires (LMPM) créé par Louis Cot à Montpellier associant chimistes (*catalystes* et *solidistes*) et mécaniciens des fluides. Leur mode de formation est multiple : création d'un institut par arrivée de groupes nouveaux dans un laboratoire préexistant (IMN, ICMCB), agrégation de laboratoires préexistants (CEMES, CIRIMAT), fondation ex nihilo d'un nouvel institut (IREM).

Comment alors se définit un institut ? En me basant sur les exemples rencontrés, je mettrais en avant les caractéristiques suivantes : c'est un centre de recherche créé à partir de la fin des années 1980, à vocation interdisciplinaire, lié au CNRS, à l'université mais aussi à des collectivités territoriales ou des industries, comprenant un nombre important de chercheurs et techniciens (entre cinquante et deux cents) issus d'au moins deux départements scientifiques du CNRS et de plusieurs sections, abordant un sujet donné (les matériaux par exemple) de manière expérimentale et théorique grâce un croisement instrumental important.²³⁴ Contrairement à la deuxième voie, l'institut se veut plus équilibré entre physiciens et chimistes, plus interdisciplinaire et beaucoup plus éclectique – le nombre de sections CNRS concernées est plus important même si l'une des sections (et par conséquent l'un des départements scientifiques) en est administrativement responsable –.²³⁵ L'interdisciplinarité est réellement le mot-clé auquel se réfère sans cesse les membres de ces instituts. On peut d'ores et déjà parler d'entité multidisciplinaire puisque des groupes de cultures très diverses peuvent se trouver regroupés en un institut commun.²³⁶ Un rapprochement géographique suffit-il à engendrer une intégration interdisciplinaire ? L'*open space* institutionnel et géographique est-il suffisant pour favoriser des discussions fécondes aux interfaces disciplinaires ? Les instituts ont-ils instauré une interdisciplinarité réelle comme aiment à le

²³⁴ L'ICMCB constitue l'exemple pour lequel j'ai le plus d'informations. Le projet est lancé en associant le CNRS, le ministère de l'Éducation nationale, la Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale (DATAR, agence interministérielle) et trois collectivités locales : le Conseil régional d'Aquitaine, le Conseil général de la Gironde et la Communauté urbaine de Bordeaux. Sur la période (1995-2005) ses effectifs passent de cent cinquante à deux cents personnes environ. Au niveau du CNRS, il dépend de trois départements scientifiques : les sciences chimiques (responsable), sciences de l'ingénieur et sciences physiques. « Nous nous sommes ouverts vers la chimie organique, la chimie moléculaire, la physique, l'étude des fluides supercritiques, les polyméristes... Entre autres, nous avons accueilli l'équipe d'Olivier Kahn. » [I Étourneau, 2005, p. 2].

²³⁵ À sa création en 1999, l'ICMCM regroupe des chercheurs des quatre sections chimiques suivantes : 16 (Molécules : synthèse et propriétés), 17 (Molécules : structures et interactions), 18 (Éléments de transition – Interfaces et catalyse), 19 (Élaboration, caractérisation et modélisation du solide) mais administrativement le laboratoire dépend principalement de la section 19 [Lettres chimie, 1999, n° 69, p. 28]. En 2000, le Laboratoire de structure et propriétés de l'état solide de Lille (LSPES), fondé par Bernard Escaig (avant 1975), est lui aussi composé de chercheurs appartenant à quatre sections différentes : 6 (Matière condensée : structures et propriétés électroniques), 15 (Systèmes moléculaires complexes), 13 (Physique et chimie de la terre) et 19 mais dépend administrativement du département de physique. [<http://www.ensc-lille.fr/recherche/cs/cs.html>, consulté en 2006].

²³⁶ « PT : Le CEMES est l'association de l'ex-Laboratoire d'optique électronique et de votre équipe [chimie du solide dans un laboratoire de chimie de coordination] ? – JG : Oui, mais en plus, en même temps, sont arrivés de Paris Christian Joachim et Jean-Pierre Launay qui a fondé le groupe de nano-sciences. Ce groupe s'est très bien développé grâce à Christian Joachim, un théoricien remarquable sur le plan international qui fait de la nanoscopie (il a été chez IBM), et André Gourdon un chimiste organicien qui crée de grosses molécules. » [I Galy, 2006, p. 16].

répéter les scientifiques en ce début vingt-et-unième siècle ? J'y reviendrai par la suite (chapitre VIII).

En résumé, les laboratoires de chimie des solides se réorganisent suivant trois voies principales : sans changer la structure familiale, ils intensifient leurs collaborations avec d'autres laboratoires non concurrents (physiciens, spectroscopistes, biologistes) ; ils agrègent un groupe de physiciens inférieur en taille (ou vice-versa) ; ils se restructurent complètement en instituts de recherche multidisciplinaires à vocation globalisante. La première voie peut être favorisée dans le cas où la succession du fondateur se passe bien (LCAES) ; la seconde lorsque des chimistes ont collaboré intimement avec des physiciens et que leur laboratoire d'accueil est devenu trop étroit ; la troisième est encouragée par le CNRS, qui voit là l'occasion de réaliser des économies d'échelle tout en agitant le nouveau leitmotiv de sa politique scientifique : l'interdisciplinarité.²³⁷ En chimie des solides, ces réarrangements correspondent à l'évolution des pratiques instrumentales (VI.2) et des méthodes de synthèse (VI.1).

Malgré toutes les réorganisations administratives, l'équipe de base fait figure d'invariant sur l'ensemble de la période 1950-2000. Si la taille des laboratoires a varié énormément en cinquante ans – parfois de un à cent (ce qui fait d'ailleurs débat : est-ce raisonnable d'agréger deux cents personnes dans un espace de cinq mille mètres carrés ?) –, la cellule quotidienne quant à elle est restée assez stable. Tous les témoins à qui j'ai posé la question sont unanimes : entre dix et vingt personnes !²³⁸ Dans le même temps, à cause de la régionalisation du CNRS qui reproduit à l'identique l'organisation du siège parisien dans chacune des « vingt délégations régionales » –, la structure administrative du CNRS a énormément enflé et pèse sur la recherche au laboratoire. Cette inflation bureaucratique va de pair avec la montée d'un sentiment désagréable d'une restriction de « la liberté » du chercheur, menacée par un État de plus en plus présent.²³⁹

²³⁷ « En 1997 le CNRS m'a demandé de fusionner et de réunir pratiquement toute la chimie du solide à Toulouse hormis celle des Laboratoires Propres pour fonder le Centre Interuniversitaire de Recherches et d'Ingénierie des Matériaux (CIRIMAT) (1998-1999). Le CIRIMAT est issu de la réunion de trois laboratoires : le [Laboratoire de Chimie des Matériaux Inorganiques et Energétiques (LCMIE)], le Laboratoire de chimie du solide de l'École de Chimie (INP), anciennement dirigé par Francis Dabosi qui était métallurgiste et le Laboratoire de Physique des Polymères (UPS) dirigé par C.Lacabanne. [...] Le CIRIMAT a trois Etablissements de tutelle, le CNRS, l'INP et l'UPS. – PT : *Que recherche le CNRS en créant ces gros instituts-là ?* – AR : Il fait des économies d'échelle et avec un seul gros laboratoire il nous permet d'être plus visible. C'est le pôle matériaux toulousain qui permet de faire davantage travailler les chercheurs entre-eux et d'avoir des complémentarités. » [I Rousset, 2006, p. 4].

²³⁸ Un service du CECM regroupait une dizaine de personnes (II.2) vers 1950. « PT : *Quelle est la taille de ces équipes ?* – MT : Cinq ou six chercheurs, avec disons trois ou quatre permanents avec des thésards et des postdoc » plus les techniciens [I Tournoux, 2006, p. 11]. « Une fois que vous avez un petit noyau de 10, 20 personnes, vous pouvez commencer à déléguer. 20 personnes, c'est d'ailleurs très agréable du point de vue des relations humaines, c'est sans doute la taille la plus efficace mais ce n'est pas suffisamment visible. » [I Rousset, 2006, p. 11]. « PT : *Vous parlez d'individus et d'équipes, quelle est la taille adéquate d'une équipe de recherche ?* – HD : Je dirai qu'il y a une notion quasi biologique de l'efficacité d'un groupe en terme de dimension, soit entre dix et quinze personnes. C'est, en moyenne et pour les sciences dures, la taille maximale pour mettre en cohérence les contributions individuelles en un groupe efficace. Il y a en France plusieurs dizaines de laboratoires qui regroupent deux ou trois cents personnes mais l'équipe de base ne regroupe qu'une grosse demi-douzaine d'individus, quelque soit leur statut : quatre ou cinq permanents (enseignants, chercheurs), deux ou trois ITA (ingénieur, technicien, administratif), quelques thésards et postdoc. Au delà cela présente trop d'intérêts divergents qu'il est difficile de garder dans un objectif commun. » [I Dexpert, 2006, p. 9].

²³⁹ « On est parti d'une administration centrale qui s'est dispersée sur vingt délégations régionales qui ont été reconstituées sur le modèle de l'administration initiale, ce qui fait que les gens s'occupant des contrats européens transfèrent aux laboratoires le boulot à faire et les laboratoires sont obligés de reconstituer une administration pour s'occuper des contrats, les gens qui font les contrats sont plongés dans la rédaction de leurs trucs parce qu'ils sont finalement plus compétents que les administratifs qui sont susceptibles de s'en occuper. Alors c'est le bordel ! Je pense qu'on va dans le mur, on va faire du papier, on gaspille du fric. Plus ça va, plus c'est comme

VI.3.2. Relations industrielles : argent, conseil, brevet et start-up

IV.3.2.1. Le lien financier : dépendances et choix politiques

Comment évoluent les interactions entre la chimie des solides universitaire et l'industrie des matériaux au cours de la période 1970-2000 ? La question est cruciale dans la mesure où les applications constituent l'un des trois piliers de la matrice disciplinaire à la fin des années soixante-dix. Premièrement, si l'on essaie d'évaluer le gain financier des laboratoires grâce aux contrats industriels, la réponse n'est pas simple. Je n'ai pas mené d'étude économique systématique dans la mesure où les rapports d'activité que j'ai consultés aux archives de Gif-sur-Yvette ne les contenaient pas. Je vais néanmoins essayer de fournir quelques éléments de réponse.

Pour toute la période 1950-2000, l'essentiel des salaires des permanents provient du financement public (CNRS et université). Or, les salaires représentent une proportion très importante du budget total de la recherche universitaire. Pour l'ensemble du CNRS, la part des salaires croît de 76% en 1950 à 84% en 1982 [Picard, 1990, p. 214]. Quatre cinquièmes du budget du CNRS sont destinés à ses employés (avec une légère hausse en cinquante ans). Pour un laboratoire de chimie, la proportion des salaires est moindre pour trois raisons : faible proportion d'administratifs ; fort budget de fonctionnement (réactifs, énergie) et matériels (appareils de synthèse et de caractérisation) par rapport aux sociologues par exemple ; apport de financements extérieurs (grâce aux applications potentielles). À la fin du siècle, la part des salaires représente environ 70% du budget consolidé d'un laboratoire de chimie des solides.²⁴⁰ Comment se répartit le reste du budget ? Crédits récurrents (publics) et contrats ponctuels (privés ou publics). En 1988, le directeur de la chimie, Fayard, estime qu'un équilibre correct correspond à une répartition par tiers du budget hors salaire : un tiers venant du CNRS, un tiers du ministère de l'Éducation nationale, un tiers de l'industrie [Lanciano-Morandat, 1999, p. 62].

Le travail de directeur de laboratoire consisterait ainsi de plus en plus à trouver des financements extérieurs. Les années 1970 sont marquées par une baisse relative des crédits publics du CNRS et de l'université. Malgré des effectifs de chercheurs en croissance continue sur la période 1975-1990, les thésards de l'époque ont l'impression d'une stagnation des postes ouverts entre 1975 et 1985.²⁴¹ Après les efforts soutenus de la politique

ça, je n'y peux rien. Malheureusement (rire). » [I Galy, 2006, p. 27]. « il me semble que sur tous les plans la liberté du chercheur s'est réduite. L'État tend de plus en plus à organiser la recherche. Les contraintes administratives ont augmenté. » [I Hérol, 2007, p. 8].

²⁴⁰ Ce chiffre est fourni par un directeur de laboratoire en exercice (Jean-Luc Adam, Laboratoire des verres et céramiques à Rennes), qui a récemment été « chargé de mission » de la section 19 du CNRS [RA CNRS, 2001], ce qui augmente la fiabilité de cet ordre de grandeur. « PT : *Qu'est-ce que ça [le budget matériel] représente par rapport aux salaires ?* – JA : Les salaires représentent environ 70% du budget global du laboratoire. C'est aussi un chiffre assez typique pour un laboratoire de chimie du CNRS. » [I Adam, 2006, p. 4]. Le rapport d'activité du laboratoire donne 72% pour l'année 2002 [RA LVC, 2002].

²⁴¹ Une étude statistique indique, pour le département des sciences chimiques, une hausse de 3,5% (1976-1983) puis 1,7% (1984-1989) des effectifs chercheurs avant la stagnation du début des années 1990 [Lanciano-Morandat, 1999, p. 48]. En revanche, le vécu des acteurs est très différent : « quelques [recrutements] dans les années 1970. Il y a eu un trou de 1975 à 85 avec aucun recrutement de l'université et le CNRS qui maintenait ses effectifs. Jusqu'à l'année dernière, tous les directeurs de laboratoire étaient uniquement chercheurs du CNRS parce qu'il manquait une classe d'âge. Tous les gens qui auraient pu être recrutés par l'université de 75 à 85

gaullienne, le début des années 1970 est marqué par une baisse du financement de la recherche publique et privée, accentué par la crise économique après 1973.²⁴² Les organismes publics incitent donc à aller chercher des crédits extérieurs. En 1970, un « bureau des relations industrielles » est mis en place au CNRS au sein de la direction des relations extérieures. Un décret de 1979 reconnaît au Centre dans son ensemble un rôle du « fondamental » à l'« appliqué » avec en particulier une responsabilité dans les « innovations réalisées au niveau national » [Lanciano-Morandat, 1999, p. 141-142]. À son arrivée au pouvoir en 1981, la gauche amplifie le mouvement : la loi d'orientation et de programmation (15 juillet 1982 au *Journal officiel*) incite les chercheurs universitaires à une « valorisation de la recherche au bénéfice de la société toute entière », en particulier une « réconciliation de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée ». Les moyens de l'Agence nationale pour la valorisation de la recherche (ANVAR) sont renforcés [MIN, 1982]. Il s'agit bien d'aller chercher les financements privés alors que dans le même temps, le gouvernement augmente les dépenses publiques de recherche pour la recherche universitaire (de 1,9 à 2,15% du PIB entre 1981 et 1986). Comment les solidistes accueillent-ils ces évolutions ?

IV.3.2.2. La logique industrielle en chimie du solide : entre aiguillon créatif à restriction d'autonomie

La chimie du solide a inscrit les applications dans sa matrice disciplinaire (III.2.2). Suivant les métallurgistes et les chimistes des hautes températures, les chimistes de l'état solide sont en contact étroits avec les industries mécaniques et thermiques d'après-guerre (chapitres II, V). Par la suite, au cours des années 1950 puis 1960, l'aéronautique et l'industrie nucléaire (CEA) ont constitué des sources de financement importantes (IV.3.1). À partir des années 1970, les industries automobile et de l'énergie favorisent largement l'étude des superconducteurs ioniques (alumine bêta puis les nasicons) pour les piles à combustible, le stockage de l'hydrogène. La crise énergétique accentue le phénomène.

La démarche du gouvernement peut alors paraître décalée voire inutile au sein de la communauté tellement les applications ont été constitutives de la chimie du solide.²⁴³ Le taux de financement (industrie/total)_{hors salaire} égal à un tiers préconisé par Fayard semble dépassé depuis longtemps par les laboratoires de chimie du solide. Même si chacun a probablement un taux (industrie/total)_{hors salaire} différent, on peut fixer des extrêmes. Pour le minimum, un taux proche des 20% pour un laboratoire propre comme le LTR vers 1970 (IV.2.2). Faut-il voir dans ce taux très bas une raison supplémentaire pour le supprimer quelques années plus tard, en 1977 ? Pour le maximum, on pense à un institut de recherche tourné vers les applications comme le CIRIMAT, qui annonce un taux proche de 80%.²⁴⁴ Jusqu'aux années 1990 (au

n'étaient pas là. Quand je suis arrivé en 1985, j'étais le premier recruté depuis bien longtemps. C'est bien reparti à la fin des années 80 pour les embauches régulières. » [I Adam, 2006, p. 5] « je faisais une thèse pour rester dans le monde académique, je voulais entrer au CNRS pour être chercheur. [...] il n'y avait pas de poste au CNRS à cette époque-là. [après 1976] » [Maestro, 2007, p. 2].

²⁴² La décrû des investissements de recherche (publics et privés) s'amorcent avant le choc pétrolier, à la fin des années 1960. La DIRD (dépense intérieure de recherche et développement) passe ainsi 2,1% du PIB (produit intérieur brut) en 1968 à 1,8% en 1974, qui correspond en France au quinquennat de Georges Pompidou.

²⁴³ « En 1981, quand Mitterrand a été élu, j'ai vu arriver Jean-Pierre Kahn, mathématicien du PCF, avec une délégation de chercheurs, il m'a dit : "la science universitaire doit s'ouvrir aux industries privées." Ça m'a fait rire parce que nous faisons cela depuis très longtemps et nous avions dû nous battre contre les syndicats pour imposer cette idée. Au nom des grands principes, les syndicats ne voulaient pas que la recherche universitaire collabore avec les industriels. » [I Hagemuller, 2004, p. 4].

²⁴⁴ Le CIRIMAT est vu et se voit comme très tourné vers l'industrie et les applications : « Bien souvent, les industriels ont affaire à des laboratoires, comme le CIRIMAT, qui sont branchés sur l'industrie. » [I Galy, 2006,

moins), la section 19 (élaboration, caractérisation et modélisation du solide) reste en matière de contrats entre laboratoires et industriels la mieux lotie des sections du département chimie [Lanciano-Morandat, 1999, p. 120]. Aujourd'hui, il semble qu'un taux (hors salaire) de l'ordre de deux tiers en financement privé soit assez commun pour les laboratoires performants en chimie des solides comme le LCMC (Paris 6), celui des verres et céramiques (VII.3) ou l'ICMCB.²⁴⁵

Au delà des grandes tendances collectives, il est difficile de généraliser parce que chaque laboratoire a des liens privilégiés en fonction des composés solides qu'il étudie. Il vaut mieux alors regarder localement (chapitre IV). Certains de ces composés – comme les sulfures métalliques – ont finalement peu ou pas d'applications (IV.1). Le degré d'implication dépend aussi de la conception du monde des chercheurs, de leur conscience politique à un moment donné, certains syndicats refusant par exemple que la recherche universitaire soit appliquée. Ce qui est étonnant malgré tout est la faible proportion des investissements privés ramenée au budget total d'un laboratoire. Même pour un laboratoire aussi lié à l'industrie que le CIRIMAT, les financements privés restent toujours largement minoritaires : $0,8 \times 0,3 = 24\%$ du budget total !

Les bailleurs de fonds privés profitent ainsi d'une situation qui leur est de plus en plus favorable : si le fonctionnement des laboratoires est assuré par le financement public (entre les trois quarts et la totalité des dépenses), ils ont tout loisir quant à eux d'orienter la recherche universitaire en finançant tel matériau, tel programme de recherche. Le fonctionnement dépend de fonds publics, le choix des thèmes est de plus en plus financé – entendons décidé – par les sociétés privées.

Un exemple très intéressant est fourni par Rhône-Poulenc. Durant les années 1980 ou 1990, l'entreprise cherchait à rendre ses « pigments toxiques à base de chrome » moins toxiques, c'est-à-dire de supprimer les éléments lourds du matériau. Sa stratégie consiste alors à ouvrir en parallèle quatre voies de recherche. Pour ce faire, la R&D de Rhône-Poulenc finance quatre thèses sur des sujets proches dans quatre laboratoires différents de la communauté : Paris, Nantes, Bordeaux et Rennes (ou Toulouse). Pour les laboratoires, l'intérêt de chacun est évident – financement d'une bourse et de matériel – ; pour la communauté, il est non négligeable – le mode de financement renforce les « discussions » entre laboratoires rivaux, ce qui est « inhabituel » et peut être profitable – ; au niveau de l'Université, le gain cognitif n'est probablement pas optimal puisque les sujets très proches vont conduire à des « redondances ». Pour l'entreprise, la stratégie est vraiment bien pensée et le gain induit par *externalisation* de la recherche important : le coût financier est plus faible – quatre bourses CIFRE ou BDI plus des achats de matériel – qu'en interne ; les sous-traitants sont motivés pour avoir des résultats (l'étudiant pour faire une bonne thèse, le laboratoire pour avoir une seconde thèse financée) ; le savoir-faire utilisé exceptionnel (quatre des meilleurs

p. 19]. « Nous continuons à travailler sur ces matériaux [oxydes à valence mixte] avec des applications pour les enregistrements magnétiques, magnéto-optiques, optiques, pour les composants de l'électronique (varistances, thermistances...), la catalyse... mais toujours en collaboration avec l'industrie. C'est ce qui m'a permis, en grande partie, de créer ce laboratoire. Près de 80% de notre budget provient des collaborations avec l'industrie régionale, nationale ou internationale. Nous avons, en effet, des partenaires européens, japonais, américains... » [I Rousset, 2006, p. 3-4].

²⁴⁵ « *BBV : Quelle est la part de l'industrie dans le financement de votre laboratoire ?* – JL : 1/3 vient de l'État et 2/3 de l'industrie mais ce ratio n'inclut pas les salaires de chercheurs qui viennent de l'État. » [I Livage, 2001, p. 3]. « Hors salaire, ça donne environ 1/3 du ministère et du CNRS et 2/3 soutien extérieur, ce qui est un chiffre assez courant en chimie. » [I Adam, 2006, p. 4]. « Dans un laboratoire comme celui-ci [ICMCB], on vit avec environ 35% de crédits fixes et récurrents qui viennent du CNRS et un peu de l'université, mais aussi avec 65% de contrats qui viennent de l'extérieur, sur *proposals* soit industriel, soit des contrats européens ou des actions gouvernementales. » [I Etourneau, 2005, p. 11].

laboratoires de la chimie du solide) ; le gaspillage faible dans la mesure où les voies sans issue sont abandonnées dès la première thèse ; enfin, en cas de dépôt de brevets, c'est l'entreprise qui mènera le bal (VI.3.2.3).²⁴⁶ En dépensant moins qu'en interne, l'industriel gagne beaucoup en compétences et n'est pas menacé par l'appât du gain des industriels. Si les avantages de cette stratégie sont évidents pour l'intérêt privé, il n'en est pas de même de l'intérêt public. Dans quelle mesure un laboratoire universitaire, financé à plus de soixante-quinze pour cent par des subsides publics, a-t-il vocation à produire une connaissance utile à des fins privées ?

Que peut-on dire de l'évolution générale des financements industriels au cours de la période 1950-2000 ? Je propose à nouveau quelques éléments de réponse. Tout d'abord les avis des acteurs sont partagés au sein de la communauté. Certains – comme Rousset – se réjouissent de l'apport de l'industrie dans le champ universitaire de la chimie du solide, non seulement pour le soutien financier mais encore pour le déficit intellectuel et les problèmes pratiques qu'elle suscite. D'autres – comme Caro – déplorent le « drame » qui a poussé les solidistes vers les sirènes des applications, la « pression » trop forte de l'industrie qui en a résulté sur la « recherche fondamentale ». Dexpert, qui a travaillé quelques années avec Caro, réconcilie les deux jugements précédents : l'industrie aurait trop vite poussé vers les applications, laissant de côté tout un pan de la chimie « exploratoire » mais aurait aussi renouvelé les méthodes en favorisant une recherche « sur programme ». D'autres – comme Boilot – pensent que si la chimie du solide française a pu être performante c'est parce qu'elle a su rester indépendante de l'industrie.²⁴⁷ Même si chacun de ces jugements est lié aux trajectoires propres et aux conceptions personnelles des témoins, ils posent chacun à leur

²⁴⁶ « Rhodia a lancé il y a quelques années une étude visant à remplacer les pigments toxiques à base de chrome, de métaux lourds, par des pigments non toxiques. L'entreprise a financé quatre bourses de thèse, aux laboratoires de Rennes, Nantes, Bordeaux et ici, avec quatre thésards différents sur des sujets voisins. On organisait des rencontres de thésards, des discussions. Il y a des laboratoires où le projet a continué suivant les possibilités d'applications mais ici, ça s'est finalement arrêté. » [I Vivien, 2004, p. 10]. « À l'époque, Rhône-Poulenc donnait un petit crédit à Nantes, à Bordeaux... pour les faire travailler sur des sujets très voisins, c'est redondant par rapport à la recherche au CNRS. [...] C'est un problème, il faudrait que l'université française soit plus connectée avec l'industrie – je ne suis pas contre – mais il faudrait aussi que les industriels prennent conscience qu'on ne peut pas demander une recherche qui les intéresse très directement, qui n'est pas toujours proche des thèmes de laboratoire, sans contrepartie. » [I Galy, 2006, p. 18]. « *PT : Daniel Vivien m'a parlé d'un projet induit par Rhône-Poulenc pour remplacer des pigments toxiques à base de chrome par d'autres pigments. Rhône-Poulenc avait choisi de lancer en parallèle quatre thèses dans quatre laboratoires français. Est-ce que c'était une stratégie souvent employée ?* – PM : Oui, il s'avère que je me suis occupé du projet à cette époque-là, dans les années 1990, et dans mes nouvelles fonctions, j'incite les gens à le refaire. C'était assez inhabituel parce que les laboratoires ont parfois du mal à travailler ensemble. Il y avait l'équipe de Daniel, une autre à Nantes, une à Toulouse... chacun avait un sujet, on avait fait une sorte de groupe de recherche sur ce sujet. » [I Maestro, 2007, p. 10].

²⁴⁷ « René Pâris [...] m'avait conquis. C'est quelqu'un qui connaissait bien la chimie générale et minérale mais aussi l'industrie. Déjà, il illustrait ses cours de problématiques industrielles et économiques. Il avait une autre largeur de vue qu'un enseignant qui n'avait jamais quitté son laboratoire universitaire. [...] Nous continuons à travailler sur ces matériaux [...] mais toujours en collaboration avec l'industrie. C'est ce qui m'a permis, en grande partie, de créer ce laboratoire. » [I Rousset, 2006, p. 2-3]. « Il y a eu ce drame si l'on peut dire pour la chimie du solide, c'est la pression de l'industrie pour faire des choses "utiles". Beaucoup d'études fondamentales ont perdu de leur intérêt à cause de cela, c'est dommage. » [I Caro, 2005, p. 8]. « Heureusement ou malheureusement suivant l'angle d'attaque avec lequel on considère les choses, la chimie du solide, par la présence d'une importante industrie d'applications, s'est très rapidement tournée vers l'utilisation de ce qui était synthétisé à l'échelle du laboratoire. [...] Même si un des aspects positifs a alors été d'introduire en recherche fondamentale une certaine culture à travailler sur programme, la chimie de la matière condensée au sens purement exploratoire en a, je pense, quelque peu souffert. » [I Dexpert, 2006, p. 3]. « En France, il y a eu beaucoup de recherche fondamentale. L'originalité française n'est pas dans la collaboration avec l'industrie [...]. Si les gens avaient été très proches du milieu industriel, je ne crois pas qu'on aurait été aussi forts en chimie du solide. » [I Boilot, 2001, p. 4].

façon une question plus générale, touchant aux relations entre université et industrie : quel est le degré d'autonomie d'un laboratoire universitaire de chimie du solide vis-à-vis de l'industrie ? Souvent, pour ce type de questions, la description des témoins se confond avec un jugement normatif : parle-t-on de ce que l'on observe ou met-on plus avant ses craintes et ses espoirs ?

Pour ses choix de sujet, le chercheur universitaire a tendance à se considérer comme libre mais, inversement, quand il observe la communauté, il perçoit des mouvements de « mode ». ²⁴⁸ N'est-ce pas un réflexe commun de surestimer son propre libre-arbitre tout en observant le conditionnement général ? Le chercheur disposerait donc plutôt d'une autonomie relative, c'est-à-dire d'une liberté de choisir à un moment donné mais toujours parmi les sujets certifiés par la communauté. Plus le nombre de sujets certifiés est petit, plus la communauté est spécialisée. On peut se demander qui certifie ces thèmes de recherche. D'un côté, la communauté des chercheurs (qui juge ce qui est bon et ne l'est pas par ses propres organes de régulation) mais aussi des déterminismes extérieurs, au delà des frontières communautaires : physique, industrie, politique, société civile. Que signifie mener une recherche fondamentale dans un laboratoire sous contrat avec la recherche appliquée (publique et privée) ? Comment distinguer les deux si elles se côtoient aussi librement, depuis aussi longtemps, dans les mêmes institutions (laboratoire, CNRS, ministère). La réduction des financements publics contraint parfois – mais de plus en plus – de très « bons » laboratoires à accepter des contrats de type « alimentaire ». ²⁴⁹ Mais les contrats publics – comme ceux du CEA – sont aussi des incitations fortes. Que ce soit directement ou indirectement, chaque laboratoire de chimie du solide est partie prenante de logiques industrielles. De nombreux chercheurs sont conseillers scientifiques pour des sociétés industrielles : Hagenmuller pour IBM (1984) ; Pouchard pour Rhône-Poulenc (1987), Elf-Atochem (1997), EDF (1999) et le CEA (2004) ; Rouxel et Tournoux pour Rhône-Poulenc et d'autres entreprises liées aux batteries électriques ; Barboux pour Saint-Gobain... ²⁵⁰ D'autres reçoivent des prix liés au domaine industriel : prix BP de la recherche sur l'énergie (géré par Collongues) pour

²⁴⁸ « PT : Ce n'est donc pas ces contrats qui décidaient de vos sujets de recherche ? – JG : Non, j'ai toujours décidé moi-même. » [I Galy, 2006, p. 19]. « PT : Est-ce que les chercheurs sont libres de leurs sujets de recherches ? – Oui, ils sont libres de leurs sujets, mais si ça ne marche pas, il faut les changer parce que sinon ils sont sanctionnés, ils sont obligés de faire des publications. [...] C'est peut-être prétentieux mais je ne suis pas influençable, je suis ma vision (rire). Caro laissait libre vraiment. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 7]. « PT : Vous n'étiez pas non plus dans les sujets à la mode ? – HD : En rayonnement synchrotron si puisqu'on voyait arriver des tas de gens sur les quasi-cristaux, les supraconducteurs... Des camions entiers, ça passait par des comités de programme, il y avait tout un tas de filtres. Comme ce sont des instruments nationaux au service des autres, on voyait arriver les modes. [...] PT : Le choix de votre propre sujet est assez indépendant alors ? – HD : Oui, tout à fait. » [I Dexpert, 2006, p. 5-6].

²⁴⁹ « Au début, dans ce que j'appellerais les années Collongues, jusque dans les années 90, on a eu quelques gros contrats. Je ne sais pas si on avait beaucoup de petits, mais on avait l'argent du CNRS qui permettait de vivre. On n'était pas à la recherche de contrats à tout prix, presque de type alimentaire, parce qu'on avait de l'argent pour faire tourner le laboratoire. Si on choisissait un contrat, c'est parce que c'était dans notre domaine, qu'on avait le sentiment que ça nous apportait scientifiquement. Le laboratoire traitait d'égal à égal avec l'industriel. Maintenant, de temps en temps, je ne dis pas qu'on accepte de faire ce qu'on ne sait pas faire, mais on est obligé d'accepter certains contrats. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 13].

²⁵⁰ « PT : Au niveau industriel, avez-vous eu beaucoup de collaborations ? – PH : Énormément. [...] pourquoi refuser les industriels. Nous leur sommes utiles et eux-aussi. Nous ne sommes pas esclaves. Je pense qu'une bonne recherche fondamentale s'appuie sur les applications, qu'il n'y a pas de différence entre sciences fondamentale et appliquée. Nous avons travaillé avec Rhône-Poulenc, devenu Rhodia pour la chimie et Aventis pour la pharmacie, avec Saint-Gobain, Péchiney, qui a disparu aujourd'hui dévoré par son concurrent canadien Alcan, avec BASF sur les oxydes de chrome. J'ai fait partie du S.A.C. d'IBM, c'est-à-dire du *Science Advisory Committee* : trois fois par an, nous faisons des visites dans tous les États-Unis et même dans les pays européens. Je crois vraiment que la recherche est fondamentale et appliquée. On peut faire de la recherche fondamentale, bien sûr, pour soi, *per se*. » [I Hagenmuller, 2005, p. 3-4].

Tournoux (1982) ; lauréat de la Société pour l'encouragement de l'industrie pour Rouxel (1980) ; prix Schützenberger de l'Académie des sciences pour Vivien (1991) ; grand prix Gaz de France de l'Académie des sciences pour Collongues (vers 1995)...

Cette tendance aux franchissements des frontières Université/industrie tend-t-elle à croître entre 1950 et 2000 ? Rien n'est moins sûr : Chaudron et Bastien étaient déjà consultants au CEA, Jolibois gérait l'IG Farben, Pâris chez Rhône-Poulenc... La société pour l'encouragement de l'industrie nationale récompensait régulièrement les anciens étudiants de Chaudron. Je reformule ici la question suivante : quel sens donner à la recherche fondamentale d'une communauté traversée de part en part par des incitations vers les applications ?

VI.3.2.3. Politique des brevets : échec conjoncturel ou structurel en chimie du solide ?

Après le financement par contrats (VI.3.2.1) et l'influence thématique (VI.3.2.2), je voudrais insister ici sur un troisième nœud des relations entre université et industrie : la valorisation de la recherche. Sur ce point, la politique scientifique a voulu favoriser le dépôt de brevets. Même sans analyse statistique, je dispose, à travers quelques cas particuliers, de plusieurs nœuds de convergence pour la chimie des solides.

En moyenne, les directeurs de laboratoire promus dans les années 1980 et 1990 ont pris dix à quinze brevets, ce qui contraste peu avec la génération précédente : une dizaine dans l'équipe Pouchard ; neuf pour Vivien ; une quinzaine pour Livage ; quelques-uns chez Caro... Les brevets n'ont pas soulevé un vif enthousiasme dans la communauté parce que les chimistes du solide ne sont pas vraiment convaincus de leur intérêt. Les motivations des universitaires et des industriels sont disjointes. En de rares occasions, l'industriel peut aller jusqu'à prendre un brevet sur des travaux communs sans informer l'universitaire concerné. Celui-ci peut s'en rendre compte et, alors, la rupture est consommée. La plupart du temps, l'universitaire ne voit tout simplement pas ce que l'industriel fait après la collaboration : il ne sait pas si le travail commun tombe dans l'oubli ou s'il est « pillé » sans vergogne par l'industriel.²⁵¹ En effet, malgré des échanges nombreux, subsiste une frontière opaque qui brouille la visibilité d'un monde à l'autre. D'après les acteurs – essentiellement universitaires –, le brouillage opère surtout dans le sens université→industrie à cause d'une culture du secret industriel par opposition à une logique de reconnaissance publique chez l'universitaire. « Il y a toujours du secret, c'est inévitable » nous dit l'industriel à propos des résultats de la thèse qu'il finance [Maestro, 2007, p. 14]. L'universitaire doit concilier un partage de résultats

²⁵¹ « il s'agissait d'un contrat Kodak qui portait sur des problèmes de mobilité électronique [...] *BBV* : Avez-vous pris des brevets ? – JL: Il y a eu des brevets pris. Malheureusement Kodak a pris les brevets sans nous en parler. Cela ne s'est pas très bien passé avec Kodak. Mais c'est un procédé qui a été commercialisé et qui est toujours utilisé actuellement. Toutes les pellicules que vous achetez sont faites de cette façon. – *BBV* : Avez vous continué dans ce domaine ? – JL: Oui on a continué, sans Kodak. Du moins sans Kodak France, en travaillant parfois avec Kodak Etats-Unis. [I Livage, 2001, p. 1]. « Je crois que marginalement un matériau peut avoir une utilité très spécifique mais le développement jusqu'au marché, c'est vraiment l'industrie qui le mène et pas les inventeurs universitaires car 'leur matériau' va leur échapper tout de suite. [...] je suis sûr qu'on s'est fait piller sans aucun moyen de défenses. Quand vous prenez un brevet, vous décrivez ce qui est intéressant. [...] Un brevet est une divulgation. » [I Caro, 2005, p. 19-20]. « je suis co-auteur de cinq brevets mais je n'ai pas le contrôle sur tout, je ne sais pas vraiment ce qu'ils sont devenus. » [I Tournoux, 2006, p. 17]. « Au bout d'un certain nombre d'années, les choses nous échappent. Il est bien difficile de savoir ce qui se passe dans les entreprises. Parfois, certaines idées passent dans des grands groupes sans qu'on en soit averti. On a peut-être été trop bavard ou on n'a pas fait attention ; on croyait aussi qu'il y aurait des retours, en fait quand les gens ont l'information ils se débrouillent seuls. » [I Rousset, 2006, p. 9].

scientifiques (publications) avec une rétention d'informations dans les brevets économiques. De la publication au brevet, l'universitaire passe d'une recherche fondamentale à une recherche appliquée.

Mais l'opacité ne constitue qu'un des aspects du décalage entre deux mondes régis par des règles distinctes. Passer d'une sphère à l'autre dans de bonnes conditions implique une traduction complexe. Le transfert technologique n'est donc pas chose aisée.²⁵² Le brevet, qui est sensé faciliter le transfert, met en évidence le choc de deux systèmes de pensée. De part et d'autre de la frontière, la propriété intellectuelle signifie renommée ou argent. Même si après vingt ans les deux « propriétés » tombent dans le domaine public, leur mise en place est bien distincte. Accumulation de connaissances et de reconnaissances dans un cas, accumulation de capitaux dans l'autre, la légitimité n'est pas la même. Pour les premiers, il s'agit de bien communiquer et de convaincre la communauté des pairs. Pour les seconds, il est essentiel de se protéger. Conçu pour protéger l'innovation, le brevet peut aussi servir à bloquer ses concurrents en fermant une voie prometteuse, ou à les égarer vers une impasse.²⁵³ À ce jeu-là, le juriste est devenu un élément incontournable [Pestre, 2003], et ce sont plutôt les industriels qui mènent la barque en dépit de quelques (rares) feux de joie des universitaires et de (nombreux) faux pas des industriels, trop vifs à se lancer dans un projet prometteur pour ne pas laisser le champ libre aux concurrents.²⁵⁴

Les « *success stories* » universitaires ne constituent-elles pas seulement de la poudre aux yeux masquant la main-mise des marchés sur la propriété intellectuelle ? Si les universitaires suivent les industriels, c'est parce qu'ils sont démunis dans un monde dont ils ne connaissent pas les règles (besoins commerciaux, système juridique) et ne possèdent pas les armes (capitaux). Par conséquent, si les deux partis sont d'accord pour breveter, comme l'industriel est souvent le seul à pouvoir payer, c'est lui qui dépose et entretient le brevet à son nom avec l'aval des universitaires, qui y gagnent le titre honorifique d'« inventeur » et touchent rarement plus de deux pour cent des bénéfices éventuels.²⁵⁵ Lorsqu'un universitaire engage le CNRS dans un brevet, il peut espérer toucher 50% des *royalties* mais le brevet a peu de chance d'être exploité (coût exorbitant pour une institution conçue pour coordonner

²⁵² « *there are distinctions between the discourse and practice of academia and industry especially which would involve a translation between distinct social worlds. [...] the structural and social boundaries that these worlds have [...] are often difficult to cross and when they are crossed the result is not always better practice for technology transfer.* » [Webster & Packer, 1997, p. 61].

²⁵³ « En réalité, comme chacun le sait, mais après coup, la science du verre est une science du secret dans laquelle on prend des brevets sur des trucs faux pour égarer les concurrents tout en se créant une antériorité. Le contenu des brevets est nul, ce n'est que de l'intimidation parce que personne n'ira se payer un cabinet d'avocats pour savoir si ce qu'il y a dans les brevets est vrai ou faux. » [I Lucas, 2005, p. 10-11]. « Prendre un brevet, c'est bien mais on sait comment ça marche : certains industriels prennent des brevets uniquement pour que personne d'autre ne travaille dessus. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 13]. « Les brevets sont parfois déposés comme moyen de barrage pour gêner un concurrent » [I Rousset, 2006, p. 9].

²⁵⁴ « le CNRS a eu quelques *success stories* avec les brevets qui étaient suffisamment robustes pour assurer à leurs inventeurs une défense facile » [I Caro, 2005, p. 20]. « il y a des brevets qui rapportent beaucoup d'argent au CNRS, prenez le taxotère, principe actif contre le cancer, développé par l'équipe de Pierre Potier à Orsay par exemple. Ce médicament a conduit à des brevets très rentables pour le CNRS. Mais il est parfois difficile de prévoir longtemps à l'avance l'avenir d'un brevet. » [I Pouchard, 2004, p. 32]. « parfois, ça peut être très rapide. Nous travaillions avec Leméoté de CGE, sur de nouveaux matériaux d'électrode. Le concurrent de CGE au niveau international, Tan oxyde, travaillait sur les oxydes de titane et nous a rapidement contactés parce qu'il était prêt à commercialiser tout de suite. Il voulait le faire avant la CGE mais ce n'était pas du tout l'objectif et ça ne s'est pas fait. » [I Tournoux, 2006, p. 17].

²⁵⁵ « je ne connais pas les besoins économiques. On a déposé une quinzaine de brevets sur 5 années. Mais toujours pris par les industriels. » [I Livage, 2003, p. 3]. « Pour les trois brevets auxquels j'ai participé, c'est l'industriel concerné qui a déposé le brevet, c'est lui qui le possède puisqu'il a payé. Nous, nous sommes juste les inventeurs : même si ça pouvait être développé, ça ne nous rapporterait jamais rien. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 13].

des recherches scientifiques). Souvent, les brevets pris par le CNRS sont abandonnés avant le terme et peuvent être récupérés par les observateurs attentifs de la veille technologique.²⁵⁶ En cas d'abandon prématuré, les moyens de recours sont nuls.

D'autre part, l'industriel peut ne pas jouer le jeu à fond. Soit, dans le cas de PME, parce qu'il ne dispose pas de suffisamment de capitaux pour investir et industrialiser un brevet. Déposer un brevet avec un universitaire reconnu lui permet alors de nouer des contacts ou recevoir des deniers publics en participant à d'autres études. Soit, de manière plus générale, parce que les industriels français attendent beaucoup de l'État et préfère être assistés des pouvoirs publics. Pour ne pas investir trop d'argent, ils financent alors une partie seulement d'un projet qui les intéresse en premier lieu.²⁵⁷ Étrangement, lorsque par la suite il s'agit d'exploiter les brevets, la société privée n'a plus besoin d'aide. L'industriel voudrait convaincre que la collaboration entre universitaires et industriels s'opère d'égal à égal parce que chacun a son mot à dire et y trouve un intérêt.²⁵⁸ Ce qui précède suggère que l'industriel dispose d'une plus grande marge de manœuvre que l'universitaire. Face à un tel rapport de force, la politique scientifique a voulu rééquilibrer en accompagnant les universitaires dans la valorisation de la recherche.

²⁵⁶ « Si vous prenez des brevets avec le CNRS, c'est bien, vous allez avoir 50% des royalties mais vous n'avez aucune chance d'avoir votre invention voir le jour sauf exceptions – c'est arrivé –. Pourquoi ? parce que le CNRS n'a pas les armées d'avocats nécessaires pour éviter la contrefaçon. Une industrie qui a pris des brevets gagnent plus à la défense de ces brevets – c'est-à-dire en attaquant le contrefacteur – qu'à leur mise en œuvre, très souvent. Il y a un problème juridique énorme autour des brevets et de la protection intellectuelle car il faut avoir les moyens de défendre son invention. Si vous prenez un brevet avec une grosse société, vous n'aurez peut-être que 2% mais vous avez une chance de toucher quelque chose car ils ont la capacité de défendre leurs brevets. » [I Caro, 2005, p. 19-20]. « Des brevets, on pourrait en parler des heures parce que j'ai été dans toutes les situations possibles et imaginables. Sur les verres, à un moment, j'ai eu 20 brevets qui ne valaient absolument rien – nous les avions pris au début en 80, 82 – et coûtaient environ un million de francs par an au CNRS pour maintenir le portefeuille. Le CNRS, qui commençait à perdre pied à l'époque, a décidé de faire un grand nettoyage de son portefeuille et nous avons balancé tous les brevets de base. » [I Lucas, 2005, p. 10-11]. « *PT : Avez-vous pris des brevets avec les industriels ?* – MP : Nous avons dû prendre environ une dizaine de brevets dans mon équipe, mais je ne crois pas que cela ait été vraiment efficace. Je vais vous raconter une histoire à ce propos. Nous avons déposé un brevet tri-partite avec le CNRS et Rhodia sur un matériau en couches minces à qui l'on pouvait très simplement, à température ambiante, faire subir réversiblement des transitions isolant supra-conducteur (ou métal). Nous travaillions aussi sur un sujet voisin avec un groupe d'IBM Zurich. Comme le brevet coûtait cher et ne rapportait encore rien, le CNRS a décidé d'arrêter de payer les droits. IBM, au courant, s'est alors approprié la technologie. » [I Pouchard, 2004, p. 32].

²⁵⁷ « quand c'est une PME, elle n'a pas forcément les moyens d'investir et pour un nouveau matériau, le marché est aléatoire. Ce qui intéressait l'industriel, c'était d'avoir des contrats de recherche sur ce matériau. Pendant dix ou douze ans ce nouveau matériau a servi à faire des études pour le secteur militaire ou les grands groupes qui tournaient autour de l'aéronautique. Au bout de vingt ans, le brevet est tombé dans le domaine public. Je l'ai vécu difficilement parce qu'on ne s'est pas aperçu que l'industriel ne voulait faire que de la recherche développement alors qu'on espérait qu'il industrialise, qu'il investisse. On a compris cette position au bout de dix ans uniquement. » [I Rousset, 2006, p. 9]. « *PT : Les industriels français demandent l'aide des pouvoirs publics ?* – JG : Oui presque toujours : on va faire un truc mais à condition que le ministère subventionne. [...] il faut qu'il y ait une BDI avec le CNRS, et l'industriel ne donne pas grand chose en plus. C'est un problème, il faudrait que l'université française soit plus connectée avec l'industrie – je ne suis pas contre – mais il faudrait aussi que les industriels prennent conscience qu'on ne peut pas demander une recherche qui les intéresse très directement, qui n'est pas toujours proche des thèmes de laboratoire, sans contrepartie. » [I Galy, 2006, p. 18].

²⁵⁸ « *PT : Et les collaborations entre industriels et universitaires se font sur un pied d'égalité ?* – PM : Je vais vous dire que oui, l'universitaire vous dira que non (rire). Comment dire ? On essaie de faire en sorte que chacun s'y retrouve : si on travaille avec des universitaires, c'est pour mener une partie de recherche amont qu'on ne sait pas ou ne veut pas faire parce qu'on ne veut pas faire la même chose que les académiques, l'universitaire lui a accès à des problèmes, on va dire, plus appliqués qui peuvent lui permettre d'ouvrir des champs nouveaux dans sa recherche. Sur les fondements, tout le monde s'y retrouve. Ensuite, ça lui permet aussi d'avoir des moyens, des postdoc, des thésards, des contrats, des moyens qu'ils n'ont pas. » [I Maestro, 2007, p. 12].

Des dispositions ont été prises par les pouvoirs publics au cours des années 1980 pour encourager les liens industriels. Dans les interviews, l'Agence nationale de valorisation de la recherche (ANVAR) a souvent été évoquée comme un intermédiaire privilégié vers les applications. Mais en chimie du solide, son engagement n'a pas conduit à des résultats très convaincants pour le dépôt de brevets.²⁵⁹ Une seule fois, l'Agence a été mentionnée comme un élément déterminant pour aider le LCAES à poursuivre l'étude de matériaux laser, non pour déposer des brevets (IV.3.3). Une Direction de la valorisation et des applications de la recherche (DVAR) a été mise en place à partir de 1982. Une autre solution consiste à fidéliser des partenaires industriels privilégiés. Un « accord cadre » est passé entre le CNRS et Rhône-Poulenc en 1975 afin de faciliter les procédures de collaboration et de dépôt de brevets communs [Lanciano-Morandat, 1999, p. 113]. À partir de 1983, le CNRS développe les Groupements scientifiques (GS) pour « répondre à un besoin à moyen terme énoncé par un industriel » en faisant collaborer industriels et laboratoires universitaires. Enfin, il développe des unités mixtes (UM) surtout à partir de 1984, au département chimie. Ces unités ont le double statut d'unité CNRS et de laboratoire industriel. En 1977, celle que proposait Caro avec le CNET au sujet des terres rares a échoué. En revanche, le Laboratoire des composites thermostrostructuraux fondé par Naslain en 1988 avec la Société européenne de propulsion (IV.4.2.3) constitue l'une de ces douze unités mixtes du département chimie en 1993 [Lanciano-Morandat, 1999, p. 123-124]. Les universités se mobilisent aussi pour valoriser les travaux de leurs laboratoires mais depuis très récemment : elles interviennent dans les contrats entre industriels et laboratoires, ont recours à des « cabinets-conseils » pour les aider dans un métier qui n'est pas le leur. Faire une thèse, rédiger un brevet et le vendre constituent trois métiers différents. Où est censé s'arrêter le travail d'un laboratoire universitaire ? Étudier un gramme d'oxydes magnétiques et commercialiser une cassette audio sont deux métiers différents.²⁶⁰ Dans un contexte de restriction budgétaire et d'utilitarisme, les universitaires sont de plus en plus influencés par la logique du marché et leurs laboratoires de plus en plus évalués selon des critères économiques : brevets, contrats...²⁶¹ Comparativement, l'évaluation cognitive diminue.

En chimie du solide et des matériaux (excepté le sol-gel), le brevet présente trois désavantages plus spécifiques. Premièrement, la durée nécessaire pour passer de la paillasse à la commercialisation est très longue, plus de dix ans à coup sûr, « dix à quinze ans » dans le meilleur des cas, parfois beaucoup plus. Or, comme après vingt ans d'existence un brevet

²⁵⁹ « PT : Est-ce que cela signifie que la politique des brevets du CNRS n'est pas adaptée ? – MP : Je ne dirais pas cela » [I Pouchard, 2004, p. 32]. « La seule fois où j'ai pris un brevet d'Etat par l'ANVAR cela a bloqué une collaboration avec Saint-Gobain. » [I Livage, 2003, p. 3]. « Sur tous les brevets que le laboratoire a pris, aucun ne l'a été avec le CNRS via l'ANVAR. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 13].

²⁶⁰ « Maintenant, l'Université demande qu'après 3 ou 4 ans de non-exploitation d'un brevet on puisse accorder une licence d'exploitation à un autre industriel. Ce sont des clauses qui à l'époque n'existaient pas à l'Université. Actuellement nous sommes un peu mieux armés pour faire du « business » avec des brevets mais encore faut-il les vendre. Ce n'est pas le métier de l'Université. Déposer un brevet et le vendre sont deux choses différentes. Quand vous avez déposé un brevet, même sur une étude menée avec un industriel, c'est toujours difficile de négocier les retombées pour l'Université et pour le Laboratoire parce que l'industriel veut avoir un maximum de bénéfice dans l'affaire. Ces dernières années nous avons réussi, grâce à des cabinets-conseils, à négocier quelques licences où l'Université est, à mon avis, assez bien protégée. Reste à savoir si ça va marcher. [...] L'objectif premier d'un laboratoire est de résoudre des problèmes de recherche mais ce n'est quand même pas de faire du business c'est bien si ça arrive mais nous ne sommes ni formés, ni équipés pour cela. Faire de la recherche, du transfert, du changement d'échelle, oui ! Mais tout l'aspect développement industriel, marché, ce n'est pas notre boulot. » [I Rousset, 2006, p. 9]. « Effectivement, il y a très loin de l'invention à l'innovation. Entre le milligramme de solide dans un four et des milliers de tonnes de produits dans une usine, il y a des phases qui sont très longues mais qui sont maîtrisées par l'industriel. » [I Maestro, 2007, p. 8].

²⁶¹ « le CNRS nous juge sur le nombre de contrats, les débouchés industriels, le nombre de brevets » [I Kahn-Harari, 2004, p. 13].

tombe dans le domaine public, la durée exploitation éventuelle est donc très courte. Un chercheur peut donc attendre un « retour sur investissement » durant la moitié de sa carrière professionnelle.²⁶² Deuxième inconvénient : comme la chimie des solides a multiplié les voies de synthèse à partir des années 1970 (VI.1), il est possible de varier les modes de synthèse d'un composé donné, ce qui permet de contourner des brevets sans trop de difficultés.²⁶³ Enfin, si les applications potentielles sont innombrables, les matériaux commercialisés sont infiniment rares.²⁶⁴ En effet, le solide doit passer de multiples étapes de sélection pour devenir un produit commercial. Premièrement, le chercheur doit obtenir des solides aux propriétés physiques intéressantes. Ensuite, parmi eux, il faut opérer un tri par rapport aux exigences industrielles : méthode de fabrication plutôt simple, moins de solvants possibles, respect de l'environnement... Troisièmement, les laboratoires de recherche industriels procèdent un « *screening de phases* », c'est-à-dire des études systématiques en faisant varier un paramètre pour optimiser composition, structure et texture. Enfin, le nouveau matériau doit souvent remplacer des matériaux déjà commercialisés sur le marché, souvent plus simples, parfois moins chers.

Aussi le taux de nouveaux matériaux commercialisés est extrêmement faible par rapport à l'ensemble des phases solides synthétisées à la paille, probablement de l'ordre de quelques dizaines de parties par million (ppm).²⁶⁵ Réussir à passer d'une phase solide présentant un effet laser en laboratoire à la commercialisation d'un laser remplaçant pour

²⁶² « pour le retour sur investissement, rien avant 10 ou 15 ans dans les bons cas avec neuf cadavres en cours de route et un qui marche. » [I Lucas, 2005, p. 19]. « On avait espéré qu'une recherche ayant abouti à la mise au point de billes creuses métalliques, il y a vingt ans, déboucherait dans l'aéronautique. Je pense qu'un jour ces matériaux seront sur certains avions [...] Au niveau des matériaux, il faut du temps, ce n'est pas un domaine comme l'électronique où on passe rapidement du laboratoire au marché. Il faut dix à quinze ans pour imposer un nouveau matériau. Dans le domaine de l'aéronautique, c'est encore pire parce que les solutions sont drastiques au niveau sécurité. » [I Rousset, 2006, p. 8-9].

²⁶³ « PT : Un brevet, ça ne rapporte jamais rien alors ? – AR : Ça peut rapporter mais c'est difficile dans le domaine des matériaux car il y a toujours plusieurs voies pour les fabriquer. Quand vous avez découvert un matériau avec une voie donnée, c'est souvent assez facile de le refaire par une autre voie. Le contournement de brevets est assez facile, ce n'est pas comme dans d'autres domaines (industrie pharmaceutique, électronique...) » [I Rousset, 2006, p. 8].

²⁶⁴ « Finalement, il y a beaucoup d'applications potentielles et peu d'applications réelles. [I Tournoux, 2006, p. 17] « Les industriels veulent pour la nième fois étudier BaTiO₃, bon il y a longtemps que je connais la structure de BaTiO₃, ça fait quarante ans et elle n'a toujours pas changé, alors pour moi, ce n'est pas très excitant. » [I Galy, 2006, p. 19]. « il y avait l'idée qu'il y avait quelque chose d'utile dans le produit qu'on étudiait, ce qui est rarissime bien entendu. – PT : C'est rarissime qu'il y ait des projets qui débouchent sur des applications ? – PC : Oui, je crois parce qu'un matériau comme on dit, pour devenir opérationnel dans quelque chose de pratique, il faut énormément de mises au point, de reproductibilité surtout, de production en gros. Tout ceci, c'est le développement industriel qui fait ça. » [I Caro, 2005, p. 9].

²⁶⁵ « l'industriel réalise beaucoup de *screening* de phases et au final, il n'y en a pas beaucoup qui sont commercialisées [...] – PT : Avez-vous une idée de la proportion de produits nouveaux qui sont finalement commercialisés par rapport aux produits dont l'étude est entreprise en laboratoire ? – PM : Des ppm ! [parties par million] si par produit étudié, on entend une composition, une formulation donnée. » [I Maestro, 2007, p. 13].

Osons un calcul d'ordre de grandeur pour la France : en l'an 2000, le rapport d'activité du CNRS [RA CNRS, 2000] inventorie une quarantaine de laboratoires de chimie des solides (voir l'annexe A.III.1). Ce chiffre ne comptabilise pas les laboratoires non associés au CNRS. Estimons qu'en moyenne chaque laboratoire fait soutenir deux thèses par an : 80 thèses. Si chaque doctorant synthétise en moyenne une centaine de phases différentes, on compte déjà huit mille phases nouvelles. Parmi ces phases, seules dix pour cent seront publiés (soit 800) et parmi elles, seules dix pour cent seront retenues par les industriels (soit 80). Ensuite, les chercheurs des laboratoires industriels optimisent à nouveau selon leurs propres critères : pour chaque phase sélectionnée, au moins cent synthèses seront à nouveau réalisées (ce qui ramène à 8000). À peu près seize mille phases synthétisées annuellement, huit mille en Université et dans l'industrie. Disons qu'un nouveau matériau solide inorganique est commercialisé chaque année à partir d'un solide sorti d'un laboratoire français (ce qui est plutôt optimiste vu les témoignages précédents). Le taux est alors de l'ordre de soixante parties par million (0,06%).

certain usages le laser YAG, qui est très simple et bon marché, prend des décennies et exige beaucoup d'énergie.²⁶⁶ Le transfert technologique reste donc exceptionnel (VII.2). Sauf perle rare, la durée de vie d'un brevet n'est pas suffisante pour exploiter le matériau nouveau. L'intérêt de l'universitaire paraît donc dérisoire, même si tous les solidistes français ont déposé des brevets. Pour l'industrie des matériaux au contraire, le brevet constitue un ressort essentiel de son développement. Il fait partie intégrante de la stratégie générale d'une société, à tel point que sa gestion demeure « confidentielle ». L'entretien d'un pool de brevets permet un « retour sur investissement », supérieur aux sommes engagées,²⁶⁷ ce qui n'est évidemment le cas ni pour un laboratoire, ni pour une université, ni pour le CNRS.

La politique publique des brevets ne semble pas adaptée à la chimie des solides, en tout cas pour l'Université. On a plutôt envie de donner raison à Caro qu'à Rousset sur l'utilité du dépôt de brevets pour l'universitaire : absurde suivant le premier, à intensifier pour le second.²⁶⁸ Quand le solidiste s'est trouvé confronté au brevet importé de la sphère économique, il a crû qu'il pouvait s'en servir pour valoriser ses travaux universitaires. Cinquante ans de chimie du solide tendent à infirmer la pertinence de leur croyance. Comme en Grande-Bretagne [Webster & Packer, 1997], la politique scientifique n'a pas su prendre en compte dans sa gestion des brevets la complexité du transfert technologique de l'Université vers l'industrie, ni n'a su traduire les valeurs économiques qu'il portait dans un langage intelligible aux universitaires.²⁶⁹ Réciproquement, l'industrie a su manier avec habileté un outil familier, issu de son propre monde. Sans investir trop d'argent dans les laboratoires publics – moins du quart des dépenses –, elle a su faire fructifier la propriété intellectuelle. Les sociétés industrielles ont souvent pris le parti de breveter au maximum : matériau, produit ou procédé. Il semble que cette option soit payante pour une entreprise comme Rhône-Poulenc, Essilor ou Saint-Gobain.²⁷⁰ Quelques laboratoires de chimie des solides ont choisi la

²⁶⁶ « Beaucoup d'études, en particulier chez Collongues, ont été faites pour trouver de nouveaux matériaux lasers intéressants pour diverses applications. Ça reste très difficile parce qu'il faut optimiser les matériaux, ça prend du temps et les matériaux les plus classiques me semblent les plus faciles à mettre en œuvre par rapport aux innovations. Il faut tellement de temps pour mettre au point un produit industriel que ça ne vaut pas souvent le coup. Les matériaux laser qui sont utilisés aujourd'hui sont les mêmes qu'il y a vingt ans : le YAG a été mis au point tout de suite et ensuite il n'y a pas beaucoup de fluctuations. Collongues a essayé de proposer un aluminat de lanthane mais il me semble que ça n'a pas donné grand chose. [...] On revient aux matériaux qui n'ont pas été détrônés. Il y a eu de nombreuses tentatives de faire un meilleur matériau laser que le YAG (yttrium aluminium garnet) mais je ne crois pas qu'aucun d'entre eux ait remplacé un truc aussi bien optimisé que le YAG. » [I Caro, 2005, p. 9, 19].

²⁶⁷ « PT : Mais entretenir tous ces brevets coûte combien ? – PM : Ah ! ça coûte cher. Je ne vous dirai pas ce que ça coûte parce que c'est confidentiel mais ça coûte très cher à la fois pour les déposer, pour les entretenir auprès de l'office européen et mondial des brevets et pour les défendre parce que si vous avez un brevet que vous ne défendez pas, ça ne sert à rien. Nous avons donc des équipes dédiées qui suivent de près ce qui se passe. Mais ce coût a un vrai retour sur investissement, c'est une partie de la valeur du business que vous développez grâce à vos brevets. [I Maestro, 2007, p. 7].

²⁶⁸ « PT : C'est quand même un domaine qui a été beaucoup financé par l'industrie ? – PC : Oui et non : il y a eu un certain nombre de contrats donnés pour étudier les matériaux prometteurs par l'industrie, Rhône Poulenc notamment. Quand on voit les sommes mises en jeu, elles sont ridicules par rapport à ce que coûterait un développement réel. [...] c'est une absurdité de prendre des brevets » [I Caro, 2005, p. 19]. « De façon générale, je pense qu'il faut déposer plus de brevets. » et « Je pense que dans les années qui viennent, il y aura forcément, sur le nombre de brevets que dépose le CIRIMAT, des nouveaux matériaux qui seront exploités à grande échelle. » [I Rousset, 2006, p. 10, 9].

²⁶⁹ « A policy orientation that assumes that difficulties in engaging with the patent system can be resolved simply by improving the training of scientists in intellectual property law, in the filling and prosecution of patents, fails to address the complex processes » of technology transfer [Webster & Packer, 1997].

²⁷⁰ « La politique de Rhodia est de breveter tout ce que l'on peut parce que chaque fois que vous ne brevetez pas, vous prenez un risque. Chaque fois que nous n'avons pas breveté par le passé, on s'est rendu compte que d'autres ont breveté à notre place, qu'on n'a pas pu protéger les inventions... Notre politique est de breveter au

même option du tout-brevet : CIRIMAT (dirigé par Rousset) à Toulouse, Laboratoire de réactivité et chimie du solide (dirigé par Jean-Marie Tarascon) à Amiens...²⁷¹ La valorisation de la recherche peut aussi passer par le lancement de *start-up*, sur lequel je reviendrai (VII.2), option qui a le vent en poupe en France depuis la fin des années 1990.

VI.3.3. Quelles identités en chimie des solides ?

La chimie du solide s'est construite sur une identité communautaire forte au cours des années 1960 et 1970 (chapitre III). Au tournant des années 1980, les solidistes se dispersent en diversifiant les modes de synthèse, les moyens de caractérisation et l'organisation des recherches. Sans disparaître, la communauté renouvelle ses références culturelles. Quelques-uns de ses membres migrent de l'Université vers l'industrie avant de revenir (VI.3.3.1). Plus globalement, elle est séduite par la vague « matériaux » venue d'outre-Atlantique, qui lui offre l'occasion d'une acculturation (VI.3.3.2). L'image de la communauté des années 1980 et 1990 se trouve ainsi redéfinie. Moins homogène, elle paraît plus fragmentée. La matrice disciplinaire a gagné en souplesse et l'individu, à nouveau, se laisse tenté par des choix hétérodoxes (VI.3.3.3).

VI.3.3.1. À propos de migrations individuelles université/industrie

En chimie du solide, les universitaires ont noué des contacts personnels avec les industriels. Jusqu'à présent, j'ai insisté sur les collaborations entre laboratoires et industries ainsi que sur l'aller simple vers l'industrie des jeunes docteurs. Je m'arrête ici sur quelques mouvements pendulaires mettant en jeu un aller retour entre les deux mondes. Durant les années 1970, une fois recrutés, peu nombreux sont les universitaires qui se risquent vers l'industrie,²⁷² en particulier parce que l'embauche est devenue beaucoup plus difficile que dix ans plus tôt. Parmi les solidistes qui ont quitté l'Université, j'en ai repéré trois seulement qui sont revenus par la suite : Hervé Dexpert, Jean-Marie Tarascon et Philippe Colombari. C'est leurs trajectoires individuelles que je vais décrire en détaillant leurs motivations et les conditions de leur retour. Ces trois cas particuliers interrogent les possibilités de mobilité d'un corps de l'État à un autre, et du secteur public à l'industrie privée. Y a-t-il beaucoup d'opportunités, d'incitations ? Comment se passe le retour vers l'institution de départ ?

Lorsque Dexpert termine sa thèse au Laboratoire de chimie du solide de Bordeaux, il obtient un poste CNRS à Bellevue, au Laboratoire des terres rares, dans l'équipe Caro (IV.2.3) où il devient spécialiste de microscopie électronique vers 1970. Pour parfaire ses connaissances, il postule au *Cavendish Laboratory*, grand centre européen de microscopie électronique, obtient une bourse d'étude et y séjourne un an et demi. Par la suite, le CNRS lui

maximum, essentiellement sur les applications parce qu'il est plus facile de breveter une application qu'un produit. Si on peut breveter un produit, on le fait ; si on peut breveter des parties d'un procédé, on le fait aussi. » [I Maestro, 2007, p. 7].

²⁷¹ « Si vous prenez un laboratoire comme celui de Tarascon à Amiens, ils déposent un grand nombre de brevets. [...] Si vous allez le voir, vous verrez un laboratoire complètement différent de la plupart des autres laboratoires universitaires » [I Maestro, 2007, p. 8].

²⁷² « *it was rare, even more so than today, for CNRS people, or people within the public system, to go to industry.* » [I Arribart, 2001, p. 2]. Le témoin évoque la fin des années 1970. René Pâris avait aussi tenté l'aventure à la fin des années 1950 chez Péchiney (VI.1.1.2), de même que Jolibois à l'*I.G. Farbenindustrie* comme président du « Conseil chargé du Contrôle et de la Gestion » (1948-1953) à la demande du gouvernement français [Lebeau, 1954].

propose un « détachement » pour monter un groupe de microscopie électronique à l'Institut français du pétrole (IFP), à Rueil-Malmaison. Il reste environ sept ans dans ce laboratoire d'investigation rassemblant une quinzaine de personnes [I Dexpert, 2006, p. 4]. Un jeune chimiste qui a envie de bouger devient spécialiste de microscopie électronique à un moment crucial où les industriels de l'IFP décident de lancer un vaste programme sur cette technique. Il accepte alors la proposition de détachement du CNRS pour mener un projet ambitieux et monter une équipe matériaux à l'IFP. Au début des années 1980, il découvre les possibilités du « rayonnement synchrotron » pour les solides et réintègre le CNRS en rejoignant le Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique (LURE). À Orsay, il se familiarise avec les grands instruments et leur gestion en recherche jusqu'en 1995, date à laquelle il rejoint un institut de recherche, le CEMES à Toulouse.

Tarascon est lui aussi formé à Bordeaux. Après sa thèse, il accepte au cours des années 1980 une position dans l'industrie, aux Laboratoires Bell, et part aux États-Unis. Il y restera dix ans, gravissant les échelons pour obtenir un très bon poste. Pour des raisons personnelles, il décide de revenir en France. Il décroche un poste de professeur à Amiens²⁷³ où il rejoint le Laboratoire de réactivité et chimie du solide (alors dirigé par Figlarz).

Colomban quant à lui défend sa thèse financée par Air Liquide à la fin des années 1970 au Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide, puis choisit de rejoindre le groupe Boilot au Laboratoire de physique de la matière condensée (VI.3.1.3). Il y poursuit les recherches commencées pendant sa thèse sur les conducteurs ioniques et les piles à combustible (IV.3.3). En 1989, sentant la veine se tarir – les matériaux perdant du terrain par rapport à la biologie à l'École polytechnique –, il quitte l'X et rejoint l'ONERA (Office national des études et recherches aéronautiques), alors bien financé par des crédits d'armement. Durant trois ans, il a les moyens de faire quelques « belles » synthèses. Au début des années 1990 pourtant, les crédits de recherche là-aussi diminuent. Colomban réintègre alors à mi-temps le CNRS. En 1996, il abandonne son demi-poste à l'ONERA tout en gardant un rôle de « conseiller scientifique du Département matériaux ».²⁷⁴

Ces trois trajectoires offrent des exemples intéressants de traversée de frontière université/industrie. L'industriel peut être une société privée (Bell Telephone), un organisme privé (IFP) ou public (ONERA). L'IFP et l'ONERA sont des institutions fortement liées à la recherche nationale, ce qui permet au CNRS d'y proposer des « détachements » temporaires. La mise en disponibilité, prévue dans le statut des fonctionnaires, assure une migration, qui le cas échéant permet un retour. Il est donc tout à fait possible de quitter temporairement la fonction publique sans en être exclu. Chacun des trois chercheurs trouve un intérêt personnel à migrer vers l'industrie et à revenir lorsque les conditions ne le satisfont plus. Les années 1980 paraissent plus propices aux migrations que les années 1990. Probablement à cause

²⁷³ Tarascon est « un de mes élèves, quelqu'un qui connaît très bien l'industrie, il a travaillé pendant plus de dix ans aux Etats-Unis, à la Bell Telephone, il avait un poste important au centre de recherche aux Bell Laboratories mais sa femme ne se plaisait pas aux Etats-Unis et il a profité d'un poste de professeur à Amiens pour revenir en France. C'est un homme fin, averti. [...] Il a beaucoup travaillé sur les supraconducteurs. » [I Hagenmuller, 2004, p. 10].

²⁷⁴ Je « suis allé [à l'ONERA] en 1989. Il n'y avait plus d'argent à Polytechnique. La mode avait tourné : les matériaux n'étaient plus privilégiés, la biologie intéressait davantage. Moi je voulais faire des vrais matériaux, pas de la chimie en flacon. J'ai regardé un peu autour de moi. À l'ONERA, ils cherchaient quelqu'un pour redynamiser les matériaux non-métalliques, l'ancien responsable étant parti pour la Société Aérospatiale. L'ONERA fonctionnait bien : ils faisaient de la recherche amont, bien financée par l'armée et ils allaient assez loin en développement. Il y avait une grande mobilité car souvent les équipes partaient dans l'industrie avec leur projet quand il passait en phase industrielle. [...] L'ONERA jusqu'aux années 90 permettait de faire de la "belle" synthèse de matériaux ayant des finalités militaires. Ceci à pris fin vers 90-92 avec la chute puis l'effondrement des crédits et des motivations, le bottom-up de recherche militaire et les bouleversements des structures capitalistiques et industrielles de l'armement. » [I Colomban, 2003, p. 2-3].

d'une concurrence accrue, d'un doute persistant sur l'avenir et d'une moins grande disponibilité des industriels à la fin du millénaire.²⁷⁵ « En 1989, sont évoqués pour la première fois des difficultés pour les jeunes thésards de la chimie de s'intégrer sur le marché du travail. À partir de cette même date, les relations entre la recherche académique et les industriels apparaissent comme moins euphoriques et moins nombreuses. » [Lanciano-Morandat, 1999, p. 118]. On peut s'étonner que si peu de chercheurs partis vers le privé reviennent dans le public par la suite. La question des salaires joue probablement un rôle déterminant : peu de personnes sont prêtes à voir leur salaire diviser par deux ou trois à leur retour. Le grand nombre faisant la norme, un retour peut aussi être perçu par les universitaires comme un échec, ce qui dissuade certains de revenir.²⁷⁶

Si ces trajectoires transversales sont plutôt rares, il n'en demeure pas moins qu'elles font se rencontrer – pour ne pas dire se heurter – deux mondes qui collaborent, le plus souvent, du bout des lèvres. Ces chocs forgent des caractères, des identités nouvelles, dont la communauté se nourrit par la suite lorsqu'elles réintègrent ces chercheurs migrants. Les impératifs militaires (furtivité électromagnétique et résistance des matériaux) poussent Colomban à adapter des techniques sol-gel pour associer polymères, fibres de carbone et carbures de silice. Tarascon développe un savoir-faire en électrochimie aux *Bell Labs*, où il se familiarise aussi avec le dépôt de brevets, dont il devient l'un des champions universitaires en France. Pour Dexpert, son passage à l'IFP lui permet d'être à la pointe nationale de la microscopie électronique – en même temps que les physiciens d'Orsay – et de naviguer de manière transversale par rapport à de nombreux types de sujets.²⁷⁷ Enfin, tous les trois, par leur passage dans l'industrie, se familiarisent à la vision matériaux qui est utilisée par les industriels.

VI.3.3.2. La tentation « matériaux », l'exemple du PIRMAT (1982-1994)

Venu de la chimie de l'état solide en passant par les hautes températures, Collongues s'inscrit très tôt dans une dynamique matériaux comme il l'écrit lui-même dans sa notice de 1979. Mais c'est toute la communauté de chimie du solide qui est concernée : un laboratoire sur cinq fait référence aux « matériaux » dans son nom en 1975. Depuis le début de la décennie soixante-dix, les incitations des rapports d'activité du CNRS ont pris plus de corps.

²⁷⁵ « MCV : Le problème de la mobilité, c'est que les possibilités sont mal connues, on a tous les outils, tous les textes statutaires qui permettent de faire bouger les gens mais la mobilité a baissé par rapport aux années 1980. Je ne sais pas pourquoi il y a une telle frilosité, peut-être que les pressions sont plus grandes sur les chercheurs, qu'il est mieux vu de partir aux États-Unis que chez un industriel en banlieue, la conjoncture de l'industrie française aussi [...] Il y a des centres de recherche qui ferment, des délocalisations... » [I Vitorge, 2007, p. 11].

²⁷⁶ « la difficulté c'est le retour. Les commissions trouvent bizarre que l'on revienne ; on se retrouve sans salaire pendant 4 mois ! » [I Colomban, 2003, p. 5].

²⁷⁷ À l'ONERA j'« ai développé l'usage du sol-gel et des précurseurs polymériques pour réaliser des composites à matrice céramiques thermostables (à fibres C et SiC) et aussi les premiers composites tout-oxide et à gradient de propriétés pour l'absorption micro-onde (pour rendre les missiles invisibles au radars). Avec J.C. Badot [du LCAES] on était les premiers à développer la spectrométrie d'impédance complexe pour comprendre la mobilité des ions dans des superconducteurs ioniques en l'occurrence protoniques. » [I Colomban, 2003, p. 3]. « mon activité, par la spécification dans l'étude de l'arrangement atomique et de la liaison chimique, a été assez transverse par les moyens d'investigation que j'ai utilisés pour essayer de comprendre et décrire ces solides. J'ai travaillé aussi bien avec des gens qui étaient spécialistes des amorphes, les verres, des composés lamellaires quelles que soient leurs applications (électrolytes, ...), de la chimie du solide conventionnelle, des solides hyperdivisés comme les catalyseurs, le domaine des surfaces (les greffages). Je ne relève pas d'un axe vertical mais plutôt transverse. [...] Le deuxième microscope de cette classe-là qui a été installé en France l'a été à peu près en même temps au Laboratoire de physique des solides à Orsay puis à l'Institut de recherche sur la catalyse à Villeurbanne. » [I Dexpert, 2006, p. 4-5].

Dans un discours de 1977, le directeur scientifique de la chimie, Jean Cantacuzène, décrit la chimie suivant trois « axes » : « matériaux », « instrumentation » et « chimie moléculaire » [Lancianot-Morandat, 1999, p. 37]. Les « matériaux » deviennent en France l'un des enjeux de la politique scientifique. En 1980, le *Livre blanc sur la recherche* [MIN, 1980] rédigé par l'Académie des sciences à la demande du Président Giscard d'Estaing place la « science des matériaux » parmi les cinq enjeux majeurs de la physique. Après l'alternance de 1981, la loi d'orientation de 1982 poursuit dans la même voie et insiste sur l'importance des « matériaux » pour la société [MIN, 1982].

Au CNRS, la création du Programme interdisciplinaire de recherche sur les matériaux (PIRMAT) au printemps 1982 constitue une étape supplémentaire, concrète celle-là. Elle souligne que l'« importance stratégique des matériaux dans la technologie moderne est appréciée d'un vaste public et les médias s'en font largement l'écho. » Le rapport liminaire du PIRMAT définit ainsi « la science et le génie des matériaux » : « Partant des matières premières (métaux, composés organiques et inorganiques, fibres...), des opérations d'élaboration conduisent à des alliages, des céramiques, des plastiques, des semiconducteurs, des textiles... qui mis en œuvre, assemblés, constituent des machines, des engins, des dispositifs pour assurer un service. » [RA CNRS, 1982, p. 53]. La science et le génie des matériaux posent un regard transversal à travers la composition chimique (organique, minéral et hybride), l'échelle d'observation (nanométrique, micrométrique) et la structure (cristalline, moléculaire, fibreuse). Par cette *transversalité*, le PIRMAT s'inscrit dans une rupture par rapport aux logiques sociales en place. En effet, chaque sous-discipline de la chimie s'est construite sur une base élémentaire chimique (chimie moléculaire) ou sur un état physique (chimie de coordination) ou sur les deux (chimie du solide minéral). La structuration des sections du CNRS en témoigne. Le « domaine des matériaux » [RA CNRS, 1982, p. 53] ne correspond donc pas à une communauté scientifique pertinente mais juxtapose divers groupes sociaux adjacents. Les frontières ne sont néanmoins pas fixes et la mise en place du département chimie a pu rapprocher les chimistes de sections différentes.

Quels sont les objectifs, les moyens et la stratégie du PIRMAT pour mettre en œuvre la politique scientifique du CNRS ? En tant que PIR (V.2.2), il ne dépend pas des sections mais de la direction du CNRS afin de « créer une dynamique de recherche aux interfaces entre disciplines » [Lanciano-Morandat, 1999, p. 67]. « Agence d'objectifs », le PIRMAT se place à l'intersection de trois départements : chimie, mathématiques et physique de base (MPB) et sciences pour l'ingénieur (SPI), sans disposer d'unité spécifique de recherche.²⁷⁸ Ses trois moyens d'action sont : l'analyse prospective, les actions incitatives, la valorisation des matériaux. Le PIRMAT situe son projet dans la continuité des actions thématiques programmées (ATP) matériaux, ponctuelles dans les années 1970, mais veut œuvrer à une plus vaste coordination, en s'appuyant éventuellement sur le « rapport de la mission matériaux présidée par M. Causse » [RA CNRS, 1982, p. 53].

La petite équipe du PIRMAT se veut réactive, compétente et soudée. Le directeur, Jean Hanus (physicien, MPB), a choisi deux directeurs adjoints, Annick Percheron-Guégan (chimiste métallurgiste) et Joseph Dexeras (un électronicien, SPI). Trois « chargés de mission » sont choisis de manière à couvrir l'ensemble des matériaux : Jean-Pierre Vairon (polymère, chimie), Claire Dupas (électronique, MPB) et André Zaoui (mécanicien, SPI). La représentation respecte l'équilibre entre les trois départements. L'idée est que chaque membre

²⁷⁸ « PT : Il y a une expression qui m'a interpellé et qui définit le PIRMAT comme une « agence d'objectifs ». Qu'est-ce que ça signifie ? – Parce qu'on n'avait pas de laboratoire propre, de laboratoires qui dépendent de nous. Dans les structures, on se contentait de lancer les choses et on n'avait pas d'influence directe sur les laboratoires, ils ne dépendaient pas directement de nous hiérarchiquement parlant. En cela, on était une agence d'objectifs. » [I Vitorge, 2007, p. 7].

fasse en sorte que son département d'origine s'investisse. À partir de 1985, Marie-Claude Vitorge, jeune docteur en chimie spectroscopique, est nommée « secrétaire générale » du PIRMAT, c'est-à-dire « factotum » comme elle le rappelle elle-même. Enfin, une secrétaire, moins intégrée à l'équipe que les autres, complète la constitution du PIRMAT. Dès le départ, l'ambiance est excellente entre les différents membres : on travaille beaucoup, efficacement et dans la bonne humeur. L'époque est ouverte, l'organisation inédite et tout paraît possible.²⁷⁹

C'est par ses actions incitatives que le PIRMAT a été marquant. Tout d'abord, l'effort est conséquent : en 1984, douze ATP sont rangées sous le vocable « objectif matériaux » et réalisées en « étroite collaboration avec le PIRMAT » [CNRS, 1984, p. 42]. L'idée est originale. Des appels d'offre sont lancés dans la *Lettre bleue* du CNRS (Lettre d'information) puis un « comité de programme » se réunit pour évaluer et choisir les projets en concurrence. Les mots-clés sont « matériaux » bien sûr mais aussi « interdisciplinarité » et un projet ne peut être retenu que s'il intéresse plusieurs disciplines d'au moins deux départements. Dans le comité de programme, on trouve Collongues (président), Pouchard, le directeur scientifique de chaque département (Fayard pour la chimie, Lehmann pour la physique, Combarnousse pour les sciences pour l'ingénieur), un représentant du ministère, de la Mission scientifique et technique (MST) (Bernard Escaig, directeur du LSPES à Lille) et divers industriels comme Saint-Gobain (Causse), Péchiney, Rhône-Poulenc... [I Vitorge, 2007, p. 1-2].

En 1986, débute l'une des actions les plus originales du PIRMAT portant sur la « mise en forme, fatigue, rupture des matériaux ». Elle associe étroitement le PIRMAT et la MST, c'est-à-dire le CNRS et le ministère de l'Éducation nationale et de la recherche, ce qui est inédit pour un programme d'une telle envergure. Elle cherche à construire un projet associant deux ou trois laboratoires complémentaires (de départements différents) avec un, deux ou trois industriels.²⁸⁰ Une fois le projet sélectionné, chaque département scientifique impliqué et le ministère apportent une somme d'argent, qui est ensuite répartie par le PIRMAT, pour deux tiers aux laboratoires universitaires et un tiers aux sociétés industrielles. En contrepartie, chaque partie s'engage à mettre à disposition ses instruments, son personnel et à rendre compte du travail à la fin. Au CNRS, le PIRMAT dispose ainsi d'un statut à part, jalosé par certains, et s'efforce de mener à bien des actions d'envergure.²⁸¹ Il cherche à décloisonner entre universitaires et industriels, entre organismes publics – malgré une certaine duplicité du CEA –, entre disciplines elles-mêmes. En jetant des ponts au-dessus de frontières habituelles, il tente de faire collaborer ensemble des gens de cultures différentes autour de projets communs. Il incite aussi à la fondation d'une unité mixte avec Saint-Gobain, travaille

²⁷⁹ « Je garde un souvenir absolument fabuleux de cette période-là, on avait l'impression que tout était possible. L'ambiance de travail était exceptionnelle. C'était dû aussi à la personnalité de Jean, il faisait très sérieusement les choses sans se prendre lui-même au sérieux. J'aimais beaucoup travailler avec lui, avec ce côté apparemment très dilettante, il était hyper consciencieux, hyper sérieux, hyper efficace et ça c'était génial. C'était une époque où on bossait énormément mais où on rigolait tout le temps. Je suis sûre que l'ambiance au travail a une influence. » [I Vitorge, 2007, p. 10].

²⁸⁰ « Pour ces actions, des appels d'offre étaient lancés, les obligations étaient d'avoir un ou deux industriels, voire trois s'ils étaient complémentaires, deux ou trois laboratoires qui soient de départements différents avec toujours les questions de complémentarité et d'interdisciplinarité. » [I Vitorge, 2007, p. 2].

²⁸¹ « Le ministère donnait au CNRS la somme générale, qu'il avait prévue dans cette action, et c'est le PIRMAT qui redistribuait l'argent aux laboratoires publics et aux industriels, ce qui au démarrage a fait grincer des dents de la DVAR. Parce que le discours de Duby, responsable de la DVAR à l'époque, était de dire : "je me bats pour récupérer de l'argent auprès des industriels, ce n'est pas pour leur en donner !" Nous répondions que le delta que recevait le laboratoire public était nettement positif parce qu'il recevait aussi l'argent du ministère. Nous essayions de défendre l'idée de seuil critique par rapport à toutes ces actions, nous ne voulions pas un simple saupoudrage. » [I Vitorge, 2007, p. 2].

avec la SNCF pour tester la faisabilité d'un TGV à deux étages.²⁸² Il s'agit de « faire travailler des gens ensemble » [I Vitorge, 2007, p. 10].

Est-ce à dire que le PIRMAT a suffisamment marqué les esprits pour que les collaborations se poursuivent une fois le projet fini ? Pendant ou après le PIRMAT, y a-t-il mise en place progressive d'une communauté « matériaux » en France ? Il est certain que le PIRMAT popularise le « matériau », qui devient mot-clé pour obtenir de l'argent. En d'autres termes, il participe de la mode « matériaux » des années 1980.²⁸³ Il ne faut pas non plus exagérer la visibilité du PIRMAT, elle décroît assez rapidement.²⁸⁴ Au delà du mot-clé, observe-t-on des transformations du tissu social et cognitif ? En 1990, la Société française de métallurgie (créée en 1945) devient la Société française de métallurgie et des matériaux (SF2M). La science des matériaux n'a pas les moyens en France d'exister en tant que telle. Elle ne constitue pas une communauté autonome. Pourtant le CNRS – à travers le PIRMAT – y a travaillé. Certains déplorent le manque d'ouverture de l'université. Mais étrangement ce n'est pas l'enseignement qui en jeu : des DEA matériaux basés sur un triptyque « polymères », « métaux », « céramiques » sont proposés dans des universités comme Montpellier, Bordeaux ou Nantes [I Livage, 2003, p. 3]. Ce qui manque probablement est un métier : aucune carrière de chercheur ou d'ingénieur ne dépend de la science des matériaux. Ni à l'université, ni au CNRS, ni dans les écoles d'ingénieurs, on ne trouve de départements.²⁸⁵ En se plaçant aux interfaces entre trois départements préexistants, le PIRMAT n'avait pas vocation à former un quatrième département, ce qui aurait déstabilisé le découpage de 1975. Aurait-il pu le faire quand même ? La chimie représente à elle seule 13% du budget du CNRS (en 1999, 224 millions de francs, soit 40 millions d'euros 2006). Le PIRMAT a développé quelques dizaines de projet, quelques centaines de collaborations, ce qui est peu pour construire une communauté de vie.²⁸⁶ Il a fallu vingt-cinq pour

²⁸² « On travaillait avec eux, mais il ne faut pas oublier que les gens du CEA étaient aussi à la Mission scientifique et technique et que suivant les instants et comme ça les arrangeait, tantôt ils se présentaient comme recherche académique, tantôt comme industriels. C'était leur grande spécialité ! C'était aussi l'époque où il y avait eu le laboratoire mixte de Saint-Gobain à Pont-à-Mousson et où le PIRMAT avait joué un rôle d'incitateur, d'aide à la mise en place. » et « il y a eu aussi toute une époque au PIRMAT où – les TGV existaient déjà – la SNCF se posait la question "est-ce qu'il était possible de faire des TGV à deux étages ?". C'était un problème de matériaux. Je sais qu'il y a eu au PIRMAT des programmes de recherche qui ont été lancés là-dessus. » [I Vitorge, 2007, p. 8, 6].

²⁸³ « comme on savait que le PIRMAT allait donner de l'argent pour les matériaux, les gens affichaient systématiquement « matériaux » dans leurs rapports d'activité de laboratoire. C'était assez amusant, on a vu le phénomène de mode pour les matériaux » [I Vitorge, 2007, p. 5].

²⁸⁴ Vu de Rhône-Poulenc, le PIRMAT apparaît comme assez flou : « *PT* : Avez-vous entendu parler du PIRMAT ? – *PM* : C'est assez vieux, au moins dans les années 80 ! Oui, j'en ai entendu parler, je connaissais même Jean Hanus et Annick Percheron qui s'occupaient de ça. Je n'en ai pas retiré grand chose, c'était un peu flou pour moi. » [I Maestro, 2007, p. 13].

²⁸⁵ « En France il n'y a pas de Materials Science. – *BBV* : Comment expliquez vous l'échec des tentatives françaises pour constituer quelque chose comme un secteur science des matériaux ? – *JL* : Il y a eu des efforts faits par le CNRS [...] mais ça n'a jamais marché. Le public n'a pas suivi. Je pense qu'il y a eu de très bonnes collaborations entre la physique et la chimie. [...] C'est l'université qui a fait blocage. Blocage dans les structures plus que dans les mentalités. Dans les structures universitaires on est dans des départements différents. La carrière d'un physicien ne dépend pas de celle d'un chimiste. [...] avec les physiciens] on vit dans des commissions séparées, au CNRS et à l'Université. Donc ce sont des milieux qui ne sont pas amenés à vivre ensemble. » [I Livage, 2001, p. 4-5].

²⁸⁶ « Est-ce que, grâce au PIRMAT, on a une sorte de méta-communauté « matériaux » qui se met en place ou bien est-ce que chacun reste dans sa propre communauté initiale, chimie du solide, polymères, métallurgie... ? – *MCV* : On espérait créer une méta-communauté, je ne suis pas sûre qu'on ait réussi. On n'a pas réussi peut-être parce que pour que la méta-communauté se crée, il aurait fallu que le PIRMAT devienne un département matériaux et ça, on ne l'a jamais fait, on ne voulait pas non plus. Dans ce cas-là, on se serait mis à dos les autres départements et ce n'était pas le but recherché. Sachant que l'évaluation se faisait de toute façon toujours par les

institutionnaliser la chimie du solide à partir de la chimie minérale (1950-1975) alors que la section était la même ! Fabriquer une communauté demande des efforts autrement plus importants que décréter une agence d'objectifs avec quelques membres.

Même si l'expression « chimie des matériaux » est devenue plus « *fun* » que chimie du solide au cours des années quatre-vingt, l'assise communautaire n'a pas été bouleversée. Pour les universitaires français, la « science des matériaux », au même titre que la « biologie moléculaire », désigne désormais une « transdiscipline » [IUF, 1994, p. 29]. Trans-discipline qui reste du domaine idéal, sans incarnation sociale d'une méta-communauté. Pour les politiques, le « matériau » cesse d'être une priorité clairement affichée au cours des années quatre-vingt-dix.²⁸⁷

VI.3.3.3. Essor d'une communauté scientifique ouverte et multiforme

Même si l'idée « matériau » ne prend pas la forme d'une communauté, l'engouement qu'elle suscite remodèle la communauté de chimie du solide depuis la fin des années soixante-dix. Le nombre de laboratoires affichant leur priorité matériaux triple en vingt ans passant de 15 à 45% (1980-2000). Par rapport à la vision « traditionnelle », la mode matériaux favorise deux évolutions majeures. Premièrement, au niveau du composé chimique : le matériau n'est plus seulement le solide minéral. Collongues avait coutume de dire qu'un "un matériau, c'est un solide utile". La matrice disciplinaire traditionnelle portait implicitement deux présupposés : 1°) un matériau = un cristal minéral ; 2°) la chimie du solide est en amont de la chimie des matériaux.²⁸⁸ Le renouveau de la synthèse à basse température (VI.1) et des initiatives comme le PIRMAT ont convaincu les solidistes français que le mot matériau pouvait aussi désigner des substances non cristallines (amorphe, cristal liquide), non minérales (hybride, bio-compatible), non solides (à mémoire de forme, élastomère), et ni minérales, ni solides (polymères).²⁸⁹ Désormais le matériau dépasse largement la communauté du solide minéral (chapitre III) et s'assimile à une « transdiscipline » [IUF, 1994, p. 29], qui a élargi les conceptions de la matière. Matériau et chimie douce ont

sections du Comité national auquel était rattaché le département, même s'il y avait un sentiment PIRMAT qui existait, ça ne donnait pas à manger. Mais c'était un désir oui, c'était l'un des objectifs, c'est ainsi que j'analyse après coup. » [I Vitorge, 2007, p. 11].

²⁸⁷ « *BBV Quelle fut votre attitude à l'égard de la politique française sur les matériaux ?* – JF : Je regrette que le gouvernement ait abandonné pour la recherche son affichage d'une priorité matériaux. [...] Tout pays qui ignorera les problèmes de « hard » en ne privilégiant que le « soft » ou le « bio » perdra à la longue dans la compétition. » [I Friedel, 2001, p. 11-12].

²⁸⁸ « Je crois qu'il y a eu historiquement une succession de termes : on a parlé de chimie du solide puis de chimie des matériaux sans doute parce que c'était plus pratique, le matériau. Il y a eu un glissement sémantique. Quand on regarde qui faisait ça, on s'aperçoit que ce sont les mêmes, « matériau » est devenu plus mode » [I Caro, 2005, p. 19]. « *PT : Pour vous, quelle est la différence entre chimie du solide et chimie des matériaux ?* – AR : En quelques mots, disons que la chimie du solide s'intéresse davantage aux aspects conception, élaboration caractérisations structurales (électroniques et cristallographiques) alors que la chimie des matériaux est davantage tournée vers des aspects plus aval comme la mise en forme, les propriétés et surtout les applications. Vous voyez qu'il y a un continuum entre les deux et surtout pas d'opposition. La chimie du solide est à la base de la chimie des matériaux. » [I Rousset, 2006, p. 16-17].

²⁸⁹ « la chimie du solide [...] avait trop tendance à se dire : "les matériaux c'est nous !". Ça, ce n'était pas évident. [...] C'était aussi l'époque des matériaux à mémoire de forme. Quand on avait présenté les images de la chimie, on avait présenté les supra, les matériaux à mémoire de forme et les balles – vous savez – qui ne rebondissent pas, certains élastomères... » et « il y a aussi tous les polymères. Il y avait aussi une action que l'on a menée sur les matériaux biocompatibles, qui pouvaient servir à la marge avec le vivant. [...] Il y a eu les MIAM, les « Milieux aléatoires macroscopiques », pour lesquels Étienne Guyon était très impliqué, un programme qui marchait vraiment très bien. [...] Il y a les composites qui rentrent aussi en ligne de compte... » [I Vitorge, 2007, p. 12, 3-4, 5].

considérablement ouvert l'horizon « élémentaire » de la communauté et favorisé la transition de la « chimie du solide » vers la « chimie des solides ». La matrice disciplinaire voit s'élargir son objet d'étude et le champ des possibles.

Deuxièmement, au niveau de la méthode d'étude. Les trois piliers du dogme traditionnel structure-propriétés-applications sont ébranlés. La mode matériaux montre que d'autres critères peuvent être pris en compte : la quantité de produit fabriqué (le milligramme ne suffit pas toujours), la mise en forme (les supraconducteurs à haute température critique ne donnent pas des fils électriques), la texture (dont dépend la tenue mécanique), la durabilité (si un produit s'écroule quand on lui souffle dessus, ce n'est pas un matériau !). Même si certains solidistes traditionnels pouvaient déjà prendre en compte certains de ces points,²⁹⁰ la prise de conscience est beaucoup plus large à partir des années 1980. On parle aussi plus de « *process* » ou de « fonctionnalité ».²⁹¹ La communauté se met à « penser matériaux » [I Vitorge, 2007, p. 12] de manière globale.

Au delà de mots-clés et d'effets de mode, l'originalité chimique investit la matrice disciplinaire, focalisée jusque-là sur la cristallogénèse et les caractérisations structurales et physiques.²⁹² Le chimiste n'a plus de complexe à affirmer la primauté de la synthèse dans son travail. Cependant, il ne faudrait pas s'imaginer que la communauté glisse d'un bloc à partir de 1980. L'évolution est portée par des mouvements plus fins, des spécificités locales. Assez schématiquement, on peut repérer deux grandes tendances en chimie des solides, à partir des années quatre-vingt.

Premièrement, l'option conventionnelle demeure forte et productive. On se place alors dans la continuité de la chimie du solide traditionnelle, dans la filiation des mandarins des années 1970. Le triptyque structure-propriétés-applications, la synthèse à haute température et la cristallogénèse constituent la base des savoirs et savoir-faire. Quelques laboratoires en constituent le fer de lance : LCS (puis ICMCB) à Bordeaux, LCAES à Paris, rejets du LTR, CRISMAT à Caen, pôle rennais. On y trouve aussi la chimie des céramiques (à Limoges), des vitraux (Perez y Jorba), des ciments (Philippe Boch). L'influence du solide conventionnel, quoique toujours déterminante, a diminué par rapport à l'hégémonie des années 1970. Au sein de ces laboratoires, on distingue deux catégories de chercheurs : les cristallochimistes et les physico-chimistes. Les seconds se sont plutôt spécialisés sur l'aspect propriété, les caractérisations qu'elles soient spectroscopiques (RPE pour Vivien ; spectroscopie pour Antic-Fidancev, Caro) ou physiques : mesures électriques, magnétiques (Étourneau,

²⁹⁰ « Collongues disait souvent qu'un matériau, c'était un composé dont on avait mené l'étude jusqu'à l'application pratique...et aussi qu'un matériau "qui se détruit lorsqu'on le regarde fixement" n'est pas un matériau !!! » [I Kahn-Harari, 2004, p. 15].

²⁹¹ « l'une de nos bagarres était de dire "ce n'est pas parce qu'on trouve un nouveau composé solide, qu'on a trouvé un nouveau matériau". Qui dit matériaux dit aussi mise en forme, étude de la fatigue, rupture, etc. C'était l'un des leitmotifs du PIRMAT. Trop souvent, les chimistes du solide estimaient que les matériaux c'était eux. Derrière, nous disions « non ». Bien sûr on peut dire que tout matériau part de la chimie du solide, mais toute chimie du solide n'aboutit pas à un matériau. [...] MCV : Dès l'instant où l'on parle de matériaux, il y a toutes les études mécaniques, de mise en forme, la tenue au temps... [...] BBV : *Quels étaient les mots-clés qu'on utilisait pour décrire ce passage ?* [...] MCV : Là-aussi, la notion de *process* commençait à bien rentrer en ligne de compte. BBV : *Est-ce que c'était structure-propriétés-process ?* – MCV : Ça dépendait de la classe des matériaux, suivant que l'on parle de polymères ou de matériaux électroniques ou supraconducteurs. J'essaie de ne pas dire de bêtises, les éléments qui me reviennent sont ceux que j'ai dits tout à l'heure : mise en forme, fatigue, rupture, mais aussi le problème de fonctionnalité. » [I Vitorge, 2007, p. 3-5].

²⁹² « AR : La chimie du solide tire son origine, de la synthèse en phase solide. Elle fait intervenir – comme son nom l'indique (sourire) – des solides soit au niveau des réactifs, soit au niveau des produits obtenus. Les réactifs peuvent être solides, liquides, gazeux, mais dans les produits de la réaction, il y a toujours une phase solide. La caractérisation de cette phase ainsi que l'étude des propriétés font également partie du concept de chimie du solide. » [I Rousset, 2006, p. 7]. Hagenmuller et Collongues « n'ont pas créé des trucs qui sortent terriblement de l'ordinaire » [I Lucas, 2005, p. 14].

Pouchard). Ils ont développé une chimie mathématique (Caro) ou travaillé à la modélisation de composés chimiques (Pouchard). La modélisation peut être poussée encore plus loin par des chimistes formés à la théorie (Gourier, Antoine Villesuzanne, François Weill).²⁹³ Parmi les physico-chimistes, on peut encore affiner en fonction des propriétés : la physique de l'optique (Vivien, Gourier), très différente de celle des conducteurs électriques (Pouchard, Achard), très différente de celle des isolants (Caro), le ferromagnétisme (Bertaut), très éloigné du paramagnétisme (Caro).²⁹⁴ Les cristallogues quant à eux se concentrent plutôt sur le côté synthèse-structure et placent la diffraction des rayons X au cœur de la chimie du solide (Galy, Kahn-Harari, Lejus, Raveau, Tournoux, Sergent). À partir des années 1970, la cristallogue s'est renforcée grâce au couplage entre rayons X et microscopie électronique pour améliorer les déterminations structurales (Galy, Schiffmacher, Tournoux) et trouver des idées de synthèse (Hervieu, Raveau). « Conventionnel » ne signifie donc pas que les élèves n'ont fait que reprendre ce que leurs patrons avaient initié mais suggère simplement que la matrice disciplinaire des années 1970 leur a servi de base pour créer du nouveau. Ceux-là se reconnaissent pleinement dans la chimie du solide.

La deuxième tendance s'appuie sur le renouveau en synthèse induit par les basses températures et les matériaux. Les chimistes travaillent parfois à haute température mais le plus souvent recherchent une plus grande diversité des modes de production : chimie d'insertion d'oxydo-réduction (Rouxel, Ouvrard, Claire Hérold), acido-basique (Tournoux), chimie sol-gel (Livage, Clément Sanchez, Boilot, Colomban), spécialisée dans les membranes (Louis Cot), électrochimie (Jean-Marie Tarascon), réactivité chimique (Figlarz), chimie des précurseurs (Rousset), chimie des hybrides (Férey, Livage), chimie des phosphates (Montel). Certains se sont rapprochés de la chimie moléculaire (Bordeaux avec Olivier Kahn, Nantes avec Philippe Batail), sans résultat bien clair. D'autres ont poussé vers les nano-matériaux (Rousset, Colomban, Christian Joachim et Jean-Pierre Launay au CEMES) à partir des années quatre-vingt-dix. Pour la plupart, les chimistes des solides sont héritiers de la chimie du solide conventionnelle (ils ont souvent commencé dans les hautes températures). Leurs laboratoires sont des laboratoires de chimistes (Livage, Sanchez, Tarascon, Figlarz), inclus dans des laboratoires de physique (Boilot) ou des instituts (Rouxel, Tournoux, Ouvrard, Cot, Férey). Je considère ces chimistes comme moins orthodoxes que ceux du premier groupe parce que chacun à sa façon a renversé le « dogme implicite » des hautes températures par des synthèses à basse température.

Cette tendance a fait évoluer la matrice disciplinaire vers la « chimie des solides » à travers trois modifications principales. Première évolution : le triptyque est remplacé par un « tétraèdre » qui contient structure, propriétés, applications et synthèse. On réaffirme ainsi la dimension chimique.²⁹⁵ La structure prend aussi une nouvelle dimension puisqu'elle couvre

²⁹³ « Didier Gourier fait de la physique et même de la théorie. Ce n'est pas un mal : cela crée une synergie importante entre les gens qui s'occupent de la structure, de la cristallogénèse et ceux qui s'occupent plutôt de la théorie physique. » [I Vivien, 2004, p. 18]. « les théoriciens sont plutôt Antoine Villesuzanne, François Weill » [I Maestro, 2007, p. 12].

²⁹⁴ « je n'utilisais pas la théorie des bandes pour étudier les isolants des oxydes de terre rare. C'est plutôt mon collègue Achard parce qu'il étudiait les milieux métalliques, qui ne sont pas décrits de la même manière que les isolants. [...] Achard travaillait plutôt sur la question des composés à liaisons métalliques, là où il y a les fermions lourds [...] la physique du solide que j'ai connue, c'était le monde de l'électron, c'était le transistor mais je ne m'intéressais pas du tout aux questions de liaisons métalliques. Mon collègue Achard en revanche a eu beaucoup de relations avec la physique du solide car c'était des problèmes qui passionnaient la physique du solide, avec des composés à base de terres rares. Moi je restais constamment dans le monde des isolants, ou des matériaux organiques. [...] Je travaillais sur des éléments paramagnétiques et ça n'intéresse vraiment pas la physique du solide. – PT : Ils s'intéressaient plus aux ferromagnétiques alors ? – PC : Oui, c'est ça, les ferro, les ferri, les antiferro, ... Je ne faisais pas du tout cela » [I Caro, 2005, p. 16, 20].

²⁹⁵ Les choses ne sont jamais aussi simples puisque Collongues par exemple a défendu le savoir-faire en synthèse. Il « avait des sujets qui lui tenaient à cœur : il avait dit qu'avant de partir, il nous obtiendrait un

désormais toutes les inhomogénéités allant de l'atome (10^{-10} m) à l'échelle micrométrique (10^{-6} m) : taille des grains, morphologie, texture.²⁹⁶ Il s'agit d'utiliser les phénomènes physiques à différentes échelles. De ce point de vue, les solides poreux constituent un cas d'école : propriétés physiques au niveau atomique (10^{-10} m) (magnétisme, conductivité, luminescence) ; propriétés chimiques sur les surfaces (10^{-9} m) (catalyses et adsorption) ; propriétés mécaniques au niveau des pores (10^{-9} m à 10^{-6} m) (tamis moléculaire, stockage, restitution des médicaments) [Férey, 2007, p. IV]. De fait, la structure n'est pas la seule à s'exprimer à différentes échelles : parallèlement à la structure (atomique et morphologique), la propriété se dédouble : non seulement « intrinsèque » (c'est-à-dire atomique), la propriété doit aussi être « extrinsèque » (microscopique au moins) pour conduire à des applications macroscopiques.²⁹⁷ Deuxième évolution majeure vis-à-vis des conventionnels : le « procédé » devient omniprésent. Le matériau n'est plus un milligramme de composé solide (sous forme de monocristal par exemple). Il doit pouvoir être mis en forme (VII.2) et produit à grande échelle, non pas industrielle (la tonne), mais au moins dans un « atelier pilote » (dizaine de kilogrammes). Le « changement d'échelle » dans la production est crucial. Certains groupes, comme celui de Rousset à Toulouse, se sont alors spécialisés sur le « transfert de technologie » vers l'industrie.²⁹⁸ Ils doivent alors être conscients des problématiques de

appareil de tirage de monocristaux pour qu'on puisse continuer et développer la cristallogenèse, et il l'a fait. Depuis, nous nous en sommes beaucoup servis. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 14]. « Il aimait bien ces chimies appliquées des procédés, avoir des petites poudres. Lui, sur la fin de sa vie, – ce qui est quand même incroyable ! – il avait demandé à faire des monocristaux lui-même, de la cristallogenèse. Il venait me montrer ses cristaux, il avait 67, 68 ans. » [I Lucas, 2005, p. 11].

²⁹⁶ « GO : Ma définition de la chimie du solide, ce serait un tétraèdre : 1) synthèse, 2) structure (mais à toutes les échelles, de l'angström à la morphologie), 3) propriétés, 4) application qui découle principalement des propriétés et pas trop des deux autres facteurs. Sur la branche 1-2, c'est la partie analytique : composition du composé, surface spécifique, taille des particules... La branche 2-3 contient la modélisation. La chimie du solide vient du fait que les chimistes ont compris qu'ils n'étaient pas moins bons que les physiciens pour les mesures des propriétés. » [I Ouvrard, 2006, p. 3-4].

²⁹⁷ « PT : Comment vous définiriez-vous en tant que chercheur : physicien, chimiste... ? – PM : Chimiste du solide, absolument ! (rire) Je pense qu'aujourd'hui ça ne veut plus dire grand-chose [...] Si je devais définir par un terme plus précis, ce serait science des matériaux. [...] La science des matériaux suit les composés depuis leur conception, tout ce qui est cristallogénèse et relation structure-propriétés, c'est-à-dire la façon dont l'arrangement des atomes induit la propriété intrinsèque du matériaux, jusqu'aux propriétés extrinsèques des matériaux. [...] je donne toujours cet exemple-là, tiré de ma thèse : les cristaux de CrO_2 sont synthétisés sous pression parce que c'est une phase métastable. En mettant pas mal de pression dessus, on stabilise CrO_2 par rapport à Cr_2O_3 , qui est la phase à pression normale et température ambiante. Le premier cristal de CrO_2 était magnifique, nous avons un cube extraordinaire ; avec Michel Pouchard et Gérard Demazeau, on s'est dit super, ça marche dès la première manipulation. Nous avons mesuré le champ coercitif, qui devait être la propriété d'application et on a trouvé zéro oersted ! Évidemment, on a regardé les bouquins, la théorie du magnétisme et on s'est rendu compte non seulement qu'il fallait avoir une anisotropie magnéto-cristalline de la structure mais qu'il fallait avoir aussi des tailles particulières et des monocristallinités qui permettaient de développer les propriétés magnétiques. Vous avez vraiment la propriété intrinsèque, que vous donne la structure (atomique), et la propriété extrinsèque, que vous donne la synthèse (taille macroscopique). C'est la science des matériaux dans la mesure où il y a la conception et la réalisation du matériaux. C'est pareil avec les propriétés catalytiques, diélectriques dans la façon dont vous allez élaborer le matériau. C'est venu tout au long du processus » [I Maestro, 2007, p. 2].

²⁹⁸ « nous allons de la conception à l'élaboration, la mise en forme, la caractérisation, l'étude et l'optimisation de propriétés physiques et chimiques. L'un des volets très importants est le transfert vers l'industrie de nos activités : c'est la marque de notre laboratoire. Pour cela, j'ai mis en place il y a à peu près 15 ans un atelier pilote d'élaboration, qui comporte de gros réacteurs de l'ordre de la centaine de litres et des fours de grandes dimensions, de façon à faire des traitements thermiques non pas pour obtenir des grammes de poudre mais pour obtenir des dizaines de kilogrammes de poudre. Nous sommes capables de préparer un matériau sous forme de poudre à l'échelle du gramme, mais nous pouvons aussi le transposer à l'échelle du kilogramme ou au-delà. C'est très important pour un industriel parce que quand vous lui proposez quelques milligrammes de produit, il ne sait pas si votre procédé est transposable. Il y a effectivement de nombreux produits synthétisés dans les laboratoires qui restent dans les tiroirs. Nous essayons de faire la démonstration que nous sommes capables

l'industrie des matériaux : soucis environnementaux, interdiction des solvants, procédés simples. Par rapport à la voie conventionnelle, ces chimistes font un nouveau métier, plus tourné vers la mise en forme et l'optimisation.²⁹⁹ La collaboration avec l'industrie est plus étroite comme au Laboratoire (mixte) des composites thermostructuraux de Bordeaux (LCTS).

Quel est le sens d'une telle classification ? Elle ne vise pas à opposer des personnes ou des groupes constitués mais à souligner des tendances qui transforment la chimie du solide en chimie des solides. Le mode conventionnel continue d'exister au cœur de la communauté et le mode du renouveau contient des pratiques déjà anciennes (VI.1.1). Ce qui a changé durant les vingt dernières années, c'est l'articulation entre les deux modes : l'essor du renouveau et le déclin relatif du mode conventionnel. Ce changement est continu dans le temps (diachronique) et transversal dans l'espace (synchronique). Deux exemples – un thème de recherche et une thèse – vont rendre sensible cette continuité spatio-temporelle.

À la fin des années soixante-dix, le cycle de l'alumine bêta s'essouffle au LCAES (IV.3.3). Pourtant, le groupe Boilot poursuit l'étude à haute température des superconducteurs ioniques avec les « nasicons » (VI.3.1.3). Au milieu des années quatre-vingt, il opte pour des synthèses sol-gel afin d'augmenter la mobilité protonique des nasicons. À la même époque, le groupe Tournoux, héritier de l'école *hagemullerienne*, s'intéresse aussi aux superconducteurs ioniques de Collongues. Les « Nantais » ont commencé à développer une chimie d'intercalation acido-basique inédite et la testent pour fabriquer de nouveaux superconducteurs protoniques.³⁰⁰ La chimie douce donne des solides prometteurs mais il faut les changer en matériaux avec l'aide d'électrochimistes et de polyméristes. Le travail des deux groupes rend concret le passage progressif de la chimie du solide (à haute température) à la chimie des solides (à basse température : sol-gel et insertion) en suivant un thème unique de recherche (superconducteur ionique) en vue d'applications (piles à combustible).

En 2004, j'ai assisté à une soutenance de thèse en chimie du solide. C'était le 8 décembre dans l'amphithéâtre d'honneur de Chimie Paris. Ému mais serein, Lionel Beluze présentait son travail sur les *Matériaux et systèmes électroactifs dans l'infra-rouge* qu'il avait préparé au LCAES. Il avait eu la gentillesse de m'inviter à la cérémonie. Sa présentation orale adoptait un ordre quaternaire : "applications" (comment en jouant sur le spectre d'émission IR d'un objet peut-on le dissimuler ?), "propriété" (appliquer un champ électrique à une cathode pour modifier son spectre de diffusion en surface), "matériaux" (la cathode envisagée est le composé solide $\text{LiCoO}_2/\text{WO}_3$), "synthèse" (insertion de lithium par chimie douce). À l'aide d'électrochimie (pour la synthèse) et d'optique (il avait utilisé des théories optiques et spectroscopiques élaborées), il voulait mettre au point un matériau contenant des couches de structures et compositions variables. Lionel revendiquait une démarche "interdisciplinaire" et terminait sa présentation en montrant une photo de tous les gens avec qui il avait collaboré en dehors du Laboratoire : ils étaient au moins une cinquantaine ! Son discours n'avait cessé de m'interpeller et je voyais se dérouler le programme de recherche de Collongues, les

d'effectuer ce changement d'échelle et, si nous réussissons, il y a de fortes chances que l'industriel puisse faire le passage du kilo à la tonne. » [I Rousset, 2006, p. 5-6].

²⁹⁹ « Ce qu'ils recherchent chez Abel Rousset, c'est la microstructure, faire des grains plus gros, plus petits, tassés, pas tassés... ce qu'ils font très bien. C'est une autre discipline, intéressante aussi, la céramique, mise en forme, maîtrise de la granulométrie... mais ça n'a rien à voir avec ce que j'ai fait » [I Galy, 2006, p. 19].

³⁰⁰ « On regardait de près ce qu'il [Collongues] faisait [...] sur l'alumine bêta » [p. 12] « j'ai travaillé sur la chimie douce, synthèse et caractérisations d'oxydes de faible compacité, puis les oxydes à forte mobilité ionique et nouveaux conducteurs protoniques, en particulier les conducteurs protoniques que l'on voulait valoriser en tant que membranes dans les piles à combustible, ce qui fait encore l'objet de contrats avec le CEA. La conduction protonique était bonne mais il fallait donner une tenue mécanique aux membranes, on travaille en collaboration avec des polyméristes, des électrochimistes » [I Tournoux, 2006, p. 10].

collaborations avec la physique et l'industrie. Le doctorant avait travaillé grâce à un financement conjoint de la DGA et de EADS, les militaires étant intéressés par la "furtivité optique", la société aérospatiale par la "protection thermique des satellites" (interne et externe). Une partie de ses résultats devait rester confidentielle pour des raisons "évidentes". Mais je percevais aussi, à mesure que Lionel parlait, de nouveaux éléments : la synthèse à basse température (électrochimie), des références aux théories quantiques – j'appris, étonné, l'existence de "bi-polarons", auxquels je ne compris goutte –, une conception plus aboutie du matériau (fabriquer une électrode). En une seule thèse, on retrouvait le mode conventionnel associé à des éléments hétérodoxes. Et dans le jury, on trouvait réunies les écoles conventionnelles – Stéphane Jobic (IMN), Guy Campet (ICMCB), Noël Baffier et Jean-Claude Badot (LCAES) –, les tendances nouvelles – Jacques Livage (LCMC) et Jean-Marie Tarascon (LRCS) – ainsi que les industriels finançant le projet – Valérie Lucas (EADS) et Philippe Sigaud (DGA) –.

Ainsi, un même doctorat peut simultanément concilier plusieurs modalités de recherche et un unique thème de recherche être successivement abordé par des modes distincts. Réciproquement, au sein d'un même laboratoire, les comportements peuvent varier énormément d'un individu à un autre. Pour les congrès par exemple, si certains assistent aux grand-messes du type *Materials Research Society*, d'autres préféreront des colloques plus ciblés sur un thème « élémentaire » (terres rares), portant sur une propriété spécifique (luminophore) ou un colloque bi-national (avec Israël, la Pologne, le Japon, le Maroc).³⁰¹ Alors, en traversant simplement le couloir d'un laboratoire, on se retrouve dans une toute autre communauté internationale. Les références identitaires se superposent, s'imbriquent. L'industriel et l'universitaire n'iront pas forcément aux mêmes congrès, le premier raisonnant plus suivant ses objectifs – luminescence, conduction ionique –, le second préférant un congrès de chimie du solide ou un congrès élémentaire. Mais il n'y a pas de règle absolue non plus puisqu'un industriel qui produit et vend des terres rares pourra aussi aller aux congrès élémentaires.³⁰² Si la chimie du solide s'est construite sur le solide minéral à haute

³⁰¹ « les communautés se réunissent soit par grands thèmes transversaux comme chimie du solide, matériaux (à la *Materials research society*), soit par thèmes d'applications comme luminescence, optique, catalyse, magnétisme... C'est dans ces derniers congrès que vous trouvez le maximum de croisement d'ailleurs. » [I Maestro, 2007, p. 4]. « personnellement, je ne vais pas tellement aux congrès de la MRS. [...] Mais il y a des chercheurs dans le laboratoire, y compris d'autres équipes du laboratoire, qui y vont parce qu'à la MRS [...] je fréquente plutôt les congrès spécialisés ou les congrès thématiques binationaux : France-Israël, France-Pologne, France-Japon... On retrouve alors les collègues français pour les organiser, parce que là, c'est la France, donc tous les laboratoires. Ces congrès sont une occasion d'interactions fortes avec les collègues travaillant dans les mêmes disciplines que nous. » [I Vivien, 2004, p. 15-16]. « j'allais à des conférences sur la spectroscopie des terres rares, plus spécifique que les *Materials Research Science*. J'allais aux Congrès des terres rares : il y avait alternativement sur 3 ans un congrès en Europe, un aux États-Unis et un dans les autres pays : Brésil, Japon, Australie. Nous allions en Pologne à des conférences internationales parce que nous avions des accords bilatéraux. Il y a eu beaucoup de conférences au Maroc « chimie (et physique) de l'état solide » où toutes les communications sont en français, tous les trois ans. Au niveau national, nous avons tous les 18 mois, les réunions du « Groupe français des luminophores » qui réunissait les différents laboratoires en France. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 9].

³⁰² « Si vous raisonnez en industriel, vous favorisez les participations à des congrès thématiques. Si on fait de la luminescence par exemple – je ne prends pas au hasard puisque chez Rhodia, on est très impliqué dans la luminescence puisque on est fabricant de terres rares – on va aller aux congrès de luminescence ou des nouveaux luminophores pour les écrans plasma... On ira moins à un congrès de chimie du solide, qui est plus un congrès de compétence, parce qu'il concerne des questions beaucoup plus en amont. [...] mais] on est fabricant de terres rares. Sur cet exemple-là, on est forcé de d'être dans tous les congrès qui parlent de terres rares parce qu'il peut s'y dire des choses intéressantes. Dans le congrès des terres rares, vous allez trouver des sessions de chimie du

température, la chimie des solides a conduit à une communauté multipolaire. Les nouvelles tendances ne forment pas du tout un bloc homogène mais divergent selon leurs spécificités propres. La communauté subsiste grâce à son ancrage institutionnel (section CNRS, université) et une forte identité commune (récit légendaire, filiation historique). La matrice disciplinaire quant à elle s'ouvre à de multiples influences frontalières. On (re)découvre des affinités avec la catalyse, l'électrochimie³⁰³ comme au temps de la chimie de l'état solide.

Les repères identitaires sont moins visibles que trente ans plus tôt. Ceux que leurs élèves et les élèves de leurs élèves appelaient les « pionniers », les « fondateurs », les « pères » s'éloignent dans la mémoire collective. Ils deviennent de tranquilles aïeux dont les jeunes doctorants connaissent à peine le nom. En ce début de millénaire, le récit légendaire semble hésiter, à la croisée des chemins : doit-il se figer en « mythe » fondateur d'une discipline ou disparaître de la scène publique ? Moins de mandarinat, plus de mobilité post-doctorale, plus de croisements pour le recrutement de jeunes chercheurs,³⁰⁴ plus de liberté pour assister aux congrès. Un à un, les référents communautaires faiblissent : récit oublié, sangs mêlés, spécificités des écoles tombées en désuétude, matrice disciplinaire multiforme. À l'Institut universitaire de France (IUF) où ils ont été admis à sa création en 1991, Pouchard et Rouxel ont choisi des noms de chaire différents : « physico-chimie des solides inorganiques » pour le premier, « chimie de la matière condensée » pour le second [IUF, 1994]. Quand il se présente pour obtenir une chaire du Collège de France en 1997, Rouxel choisit « chimie des solides ». Quand Livage y entre à son tour, il préfère « chimie de la matière condensée », peut-être pour faire pendant à la chaire du prix Nobel, de Gennes, « physique de la matière condensée » [I Livage, 2001, p. 3].

Si la dualité cœur/périphérie pouvait être utile en chimie du solide des années 1960 (position des Pâris) ou 1970 (trajectoire des fours solaires), elle perd sa pertinence pour la chimie des solides des années 1980 ou 1990. Un laboratoire universitaire travaillant en sol-gel peut très bien interagir avec quatre ou cinq communautés différentes, et s'inscrire dans le tissu industriel : verriers, céramistes, organiciens, minéralistes, biologistes [I Livage, 2001, p. 2]. Les référents identitaires se multiplient. Chaque laboratoire choisit désormais ses propres mots-clés suivant les modes politiques ou économiques. Mots-clés pour obtenir des subsides d'abord, qui deviennent bientôt des repères identitaires par lesquels on se situe dans la nébuleuse, et qui peuvent dégénérer en mots-valises sans fin : matériaux, superconducteurs ioniques, matériaux laser, matériaux supraconducteurs, matériaux par chimie douce, nano-matériaux, nano-bio-matériaux... Et si l'on s'étonne d'entendre encore parler de chimie du solide dans la communauté en 2007, c'est qu'on a la faiblesse de croire encore qu'une communauté scientifique possède une unité épistémologique.

solide, chimie de coordination, magnétisme, applications à la luminescence, biomédical... il y aura toutes les applications des terres rares. » [I Maestro, 2007, p. 4].

³⁰³ « *BBV* : Est-ce que ce virage vers les verres organo-minéraux a changé votre place dans la recherche ? – JPB: Au niveau du CNRS, non, car on appartient toujours à la famille chimie du solide. Mais on a eu des contacts industriels nouveaux avec Saint-Gobain, Essilor. Bien sûr pendant deux ans, on a eu un peu de ralentissement dans la production de publications. Mais le virage se fait bien. » [I Boilot, 2000, p. 3]. « Par exemple ce que j'ai fait sur les cristaux liquides c'est avec des physiciens d'Orsay. Pas mal de choses en électrochimie, sur les batteries aussi avec des labos de physique » [I Livage, 2001, p. 5].

³⁰⁴ « Durant ces dix dernières années, il y a eu beaucoup plus de croisements entre les labos que ce qu'il y avait avant. Même dans le monde universitaire, ces écoles se perdent un peu. » [I Maestro, 2007, p. 9].

Conclusion

Jusqu'aux années 1970, les mandarins de la chimie du solide ne jurent que par les hautes températures et défendent le monocristal parce qu'il est le seul garant d'une caractérisation physique impeccable. Associée au solide cristallin, la diffraction des rayons X représente la méthode par excellence, symétrique et juste. La cristallographie est alors la spécialité la plus prisée parce qu'elle joue à l'interface entre synthèse et structure sur l'originalité chimique. Au cours de la décennie soixante-dix, la chimie du solide s'enrichit de nouvelles synthèses à basse température. Originales ou remises au goût du jour, ces synthèses permettent d'obtenir non plus le seul produit « thermodynamique » mais aussi des produits « cinétiques ». En jouant sur les conditions opératoires, le chimiste peut favoriser tel produit métastable, finement divisé ou amorphe. La recherche effrénée de la pureté s'incline devant la richesse des « *dirty materials* ». Ces composés exotiques (par rapport au monocristal tridimensionnel) émergent aussi parce qu'il est désormais possible de les caractériser. En effet, les Trente Glorieuses en France ont donné les moyens aux chimistes de se procurer des instruments de caractérisation, longtemps réservés aux physiciens spécialisés : microscopie électronique, spectroscopies, RPE, RMN, EXAFS... En contrepartie, la diffraction des rayons X perd son statut hégémonique même si elle reste l'outil de base des laboratoires. C'est à ce moment-là que se produit l'une des évolutions les plus marquantes de la chimie du solide : le couplage instrumental. Il consiste à étudier un solide (exotique ou cristallin) en croisant les informations obtenues par plusieurs techniques : diffraction X avec microscopie électronique, RMN avec EXAFS... Certains laboratoires utiliseront même le couplage instrumental pour renouveler leur créativité en synthèse, poussant là jusqu'à sa limite le génie de la cristallographie. À partir des années 1980, l'informatique représente une innovation majeure que ce soit pour la technologie instrumentale mais aussi pour la gestion de la littérature scientifique.

Au début des années quatre-vingt, les synthèses à basse température cristallisent en France sous la forme « chimie douce ». L'expression pare la chimie du solide des valeurs de son temps : économe en énergie (basse température) à une époque de crise énergétique ; respectueuse de l'environnement (si on oublie les solvants organiques nécessaires) à une époque de crise écologique (après la remise en cause des *sixties*) ; bon marché et accessible à tous à une époque de tiers-mondisme triomphant (guerre du Viêt-Nam). En portant l'image (mythique) d'une chimie baba cool et pacifiste, l'expression « chimie douce » fait le tour du monde en français. Dans l'esprit des acteurs, elle constitue une nouvelle branche de la chimie du solide, qu'elle s'efforce de renouveler. Ce renouveau des basses températures mais aussi de l'électrochimie conduit la chimie du solide à devenir ce que j'ai appelé la « chimie des solides ». En effet, ce qui contraste avec le milieu des années soixante, c'est la diversité des solides : non plus seulement le cristal minéral tridimensionnel en volume mais aussi les cristaux à « basse dimensionalité » (périodicité à une ou deux dimensions), les gels, les couches minces, les fibres, les amorphes (verres), ou les solides poreux (dont les zéolithes). Plusieurs voies de synthèse sont explorées : sol-gel, insertion, électrochimie, méthode des précurseurs... Éléments minéraux et polymères, états solide et liquide sont brassés par les techniques sol-gel ; composés organiques et inorganiques sont mélangés pour donner des « hybrides » ; la tentation d'aller du solide au biologique s'intensifie. Certains solidistes reviennent vers la catalyse comme la chimie de l'état solide l'avait fait vers 1950. Si le dogme structure-propriétés reste bien en place, l'acception de chacun des termes s'élargit : la structure ne désigne plus seulement l'ordre atomique mais devient aussi morphologie, texture, taille de grains. Sous l'influence de l'industrie, la propriété « intrinsèque » (à l'échelle du

nanomètre), qui n'est pas suffisante pour les applications, doit devenir « extrinsèque » (au-dessus du millimètre). Les premières modélisations de composés solides commencent à être réalisées par les chimistes au cours des années 1980 mais surtout 1990. On modélise les propriétés atomiques de structures de plus en plus complexes (du cristal d'oxyde simple aux catalyseurs microporeux). On s'efforce aussi, par les calculs, de prédire des structures cristallines à partir de propriétés données. Si la simulation a peu de chance de tomber juste, elle stimule quelques chimistes désireux de renverser la séquence de la synthèse : non plus des matières premières vers le produit mais des applications vers les réactifs. Utopie d'une société utilitaire ?

La chimie des solides – comme en son temps la chimie du solide avec les superconducteurs ioniques (1970-1980) – est traversée par des modes successives. Les matériaux laser sont très en vogue au début des années 1980. Ébranlé par la crise économique, le pouvoir politique cherche un levier d'action technologique pour relancer l'économie nationale. Les « matériaux » constituent l'un des grands objectifs scientifiques du premier septennat de Mitterrand. À la fin des années 1980, la science rattrape le politique : deux physiciens d'IBM à Zürich, J.G. Bednorz et K.A. Müller, annoncent la supraconduction de « cuprates » (Y-Ba-Cu-O) à trente kelvins (30K, -243°C). Ces oxydes métalliques sont issus de la créativité chimique du laboratoire de Caen (Raveau). L'annonce fait l'effet d'une bombe dans la communauté internationale : des oxydes supraconducteurs – presque un oxymore – bien au delà des températures limites prophétisées par les physiciens. Près de dix mille chercheurs (physiciens, chimistes, *materials scientists*) se ruent dans la brèche. C'est que la supraconductivité fait rêver les amoureux du savoir et de l'argent : le mystère mis en application permettrait de transporter l'électricité sans perte Joule, de la stocker indéfiniment, de faire léviter les trains... Le prix Nobel tombe immédiatement dans l'escarcelle des deux physiciens, sans les chimistes. C'est que, dans l'imaginaire collectif, la matière (façonnée par le chimiste) est inférieure au phénomène (étudié par le physicien), qui confine au spirituel. La matière justement fait des siennes et se montre rétive : si la température critique est rapidement montée jusqu'à plus de 100K (-173°C), les « cuprates » et leurs dérivés en revanche rechignent à se laisser mettre en forme. Les "supra haute T_C" passe de mode et c'est le moment de trouver un autre mot-clé. Les années quatre-vingt-dix arrivent et ce sera la mode « nano-matériaux ». Le « nano » obsède et fascine. On aime rappeler qu'on en faisait avant et, comme un étrange son de cloche, le miracle de la modernité se reproduit à nouveau. On tente d'écrire une histoire déterminée, comme si tout cela était prévisible, prévu, déjà écrit.³⁰⁵ Simultanément, la déferlante « carbone » (fullerène, tube de carbone) envahit l'espace, même si, pour la chimie des solides, le phénomène est plus lointain. Par la suite, « matériaux » et « nano » peuvent se décliner comme des mots-valises, à l'infini : « nano-bio-matériaux » devenant le *nec plus ultra* à l'entrée dans le nouveau millénaire. Les mots-clés provoquent des engouements sans précédent. Serait-ce parce qu'ils sont un des nouveaux modes d'orientation de la recherche par les politiques scientifiques « libérales » ?

Au cours des années 1980 encore, la génération d'après-guerre s'efface et, un à un, les mandarins sont touchés par la limite d'âge. L'envie pourtant est toujours vivace. Combien d'anciens directeurs de laboratoire ne s'étaient-ils pas remis à la paille en fin de carrière ? Héroul, Collongues, Galy... Ceci est d'autant plus frappant que la cristallographie est en

³⁰⁵ « Je vais vous surprendre mais c'était le début des nanomatériaux, même si cette appellation n'était pas encore usitée » à la fin des années 1960 » [p. 1]. « avec la branche Hagenmuller c'était malgré tout très difficile. Il y avait une opposition très vive; il ne voulait pas reconnaître notre activité parce qu'on travaillait sur des poudres, à grains fins à une époque où pour la chimie du solide ce n'était pas dans l'air du temps. C'était pourtant très prometteur et je pense que les chimistes du solide de l'époque, dans leur grande majorité, se sont trompés. *Ils ne voyaient pas (mais c'était difficile, je le reconnais) que ces recherches ouvraient la voie aux nanomatériaux* (c'est moi qui souligne) » [I Rousset, 2006, p. 13].

déclin par rapport à la décennie précédente, la physico-chimie est plus attrayante et peu de jeunes chercheurs aujourd'hui s'y reconnaissent. Le départ à la retraite des cadres de la chimie du solide coïncide avec une refonte des laboratoires familiaux. Au sein des centres de recherche, les centres de pouvoir se sont multipliés, plus de chefs de groupe, plus de tensions. Au pouvoir omnipotent du directeur des années 1950 à 1970, succède une concurrence accrue entre les équipes d'une même unité de recherche. À partir de la fin des années 1980, plusieurs instituts de recherche (avec ou sans le label matériaux) sont créés avec l'aval du CNRS, qui voit là une occasion de réduire des coûts redondants : économie d'échelle, mise en commun d'instruments coûteux, réduction des personnels... Le but affiché de ces instituts est d'associer plusieurs équipes de cultures différentes au sein d'une même entité. L'objectif multidisciplinaire est à l'évidence atteint puisque les instituts juxtaposent équipes de chimie des solides avec des groupes d'organiciens, d'électrochimistes, de physiciens, de spectroscopistes. Est-ce à dire qu'ils créent un savoir hybride à la conjonction de deux ou plusieurs disciplines ? Malgré une puissante rhétorique « interdisciplinaire », les résultats sont difficiles à saisir. Qu'apporte la réunion de groupes différents au sein d'un institut unique par rapport aux collaborations informelles mais efficaces des années 1970 ? Quel intérêt y a-t-il à collaborer d'un étage à l'autre dans la mesure où les échanges internationaux sont favorisés par l'institution ? Enfin, que signifie « interdisciplinarité » si un docteur ès sciences, formé sur un sujet « interdisciplinaire » durant sa thèse, s'entend dire au moment du recrutement dans les sections disciplinaires : "vous êtes trop physique pour nous, chimistes !" ?

Les vingt dernières années 1980-2000 posent problème. Après avoir été l'acteur phare du processus historique, la « communauté » de chimie du solide semble se diluer : ses références sont moins claires et surtout plus nombreuses. En recouvrant les champs épistémologiques et politiques, les « matériaux » constituent une puissante rhétorique transdisciplinaire qui ne rend pas compte de la diversité sociale et brouille la lecture historique. Le solidiste universitaire n'est pas devenu un *Materials scientist* au sens américain et laisse une large place à l'industriel entre le matériau caractérisé (éventuellement mis en forme) et le matériau vendu.

Ce qui a changé c'est la multiplicité des références au sein de la communauté. Pour se construire, chaque acteur cultive désormais encore plus d'identités suivant sa position scientifique (cristallochimiste, physico-chimiste, chimiste sol-gel, organicien), l'équipe dans laquelle il travaille (mise en forme ou synthèse originale, transfert technologique ou simulation théorique), la position de son laboratoire au sein de la communauté (plus appliqué, plus fondamental, chimie du monocristal à haute température ou chimie douce des solides poreux), les congrès auxquels il assiste (« élémentaire », selon une propriété, expérimental ou théorique, communautaire : chimie du solide ou science des matériaux), les gens avec qui il collabore (catalystes, organiciens, verriers, spectroscopistes, biologistes). Chaque acteur se reconnaît lui-même de multiples identités et de multiples champs d'expertise. Avec l'affaiblissement du pouvoir mandarinal, les échanges deviennent plus individuels (et non plus entre mandarins : Friedel-Hagenmuller) et plus nombreux ; chaque groupe est plus libre de ses orientations thématiques et non plus engagé par cycles décennaux. Les influences sont plus transversales aussi – comme le montrent quelques cas de migration université/industrie –. Dans les instituts, à Nantes ou Bordeaux, on cherche à associer chimie de coordination et chimie du solide. Les disciplines s'interpénètrent plus (au moins institutionnellement) : un institut de recherche, un programme interdisciplinaire associent deux, trois, quatre sections du CNRS. Même s'il est difficile de conclure quant aux effets, le nombre de possibles influences explose.

Cette multiplication des identités est encore plus sensible aujourd'hui. En 2004, la section 19 du CNRS, centrée sur le « solide » (minéral et métallique) jusque-là, est devenue section 15 : « Chimie des matériaux, nanomatériaux et procédés ». Que signifie pour la communauté de chimie des solides un recentrage vers les matériaux (mot-clé transversal) et les procédés (référence aux applications industrielles) ? Lors de la commémoration des 150 ans de la Société française de chimie, du 16 au 18 juillet 2007, les solidistes ont été répartis dans quatre des six sessions thématiques proposées : « Au-delà de la chimie supramoléculaire » (Férey), « Chimie et matériaux » (Hervieu, Naslain), « L'essor de la chimie du solide » (Livage, Doumerc, Maestro, Lucas), « Chimie, énergie et environnement » (Tarascon). Aucune autre discipline, il me semble, n'a été aussi démembrée par cette répartition. Preuve, non pas d'un échec, mais bien d'un succès méthodologique, d'une efficacité de la chimie des solides pour répondre aux défis contemporains de la société. Quelles conséquences cette multiplication a-t-elle sur la communauté ? Les années soixante-dix ont marqué la mise en place de la matrice disciplinaire. À partir de cette institutionnalisation, le programme de recherche de chaque laboratoire (IV.1-4), hérité du découpage familial antérieur (II.1), a un peu perdu sa spécificité locale. Par recrutements ou influences indirectes, chaque laboratoire a métissé la « pureté familiale » en quelque sorte. L'avènement de la discipline dissolvait les écoles de recherche dans une unique matrice disciplinaire. Peu après – là est la subtilité –, la matrice disciplinaire elle-même se métissait de multiples influences (VI.1-3). La réorganisation de la section CNRS et la dissolution des solidistes dans deux tiers des « sessions » aux 150 ans de la SFC porterait ainsi l'avant-goût d'une dissolution à venir de la communauté de chimie des solides dans un ensemble plus vaste. De la même manière que la dissolution des écoles de recherche dans la communauté, la redistribution (et le démembrement) de la chimie des solides dans la chimie indiquerait un succès méthodologique. Il est probablement trop tôt pour le dire.

Quoiqu'il en soit la multiplication des références identitaires conduit à une atténuation du sentiment communautaire. La chimie du solide, qui se réclamait simultanément d'un état physique – le solide cristallin – et d'une composition élémentaire – le minéral –, se dilue en un pluralisme d'états de la matière – solide, liquide, matière condensée, cristaux liquides – et de références élémentaires – minéral, organique, polymère, hybride, fibres de carbone –. Subséquemment, la fable contant la fondation de la chimie du solide se perd progressivement dans la mémoire collective : les jeunes doctorants ne la connaissent plus, ou peu, ou très mal ; pour les plus jeunes chercheurs, les noms de Collongues, Hagemuller renvoient plus à Mathusalem qu'à un directeur de laboratoire, un président de section CNRS, un mandarin. La « légende » serait-elle en train de devenir « mythe » au sens de Meillassoux [2001] ? Par-delà les différences locales, elle constituait l'un des ciments forts de la communauté de chimie du solide. Même si, durant les années 1970, chaque acteur disposait déjà de multiples identités (cristallochimiste par opposition à physico-chimiste), l'une était prépondérante parmi les autres : « chimiste du solide » ou « *solidiste* » résumait tout le reste.

Chapitre VII.

Les verres non conventionnels :
un paradigme non conventionnel.

Chapitre VII. Les verres non conventionnels : un paradigme non conventionnel..... 461

<i>Introduction</i>	463
<i>VII.1. Un laboratoire rennais, de la chimie du solide aux verres de fluorure</i>	464
VII.1.1. Les « Rennais » : Rohmer, Hagemuller, Prigent et compagnie (1950-1975).	464
VII.1.2. Un thème classique à la fin des années 1960 : les « pyrochlores »	467
VII.1.3. Du cristal au verre : entre « sérendipité », intuition et engouement industriel (1972-1974).....	469
<i>VII.2. Émergence d'une communauté « hybride » : une illustration de la « triple hélice » université-industrie-État</i>	472
VII.2.1. Du solide chimique aux matériaux télécoms : virages techniques et sociaux du laboratoire des années 1970	472
VII.2.2. Construire et articuler une communauté des verres non conventionnels	475
VII.2.2.1. Les verres de fluorure, une convergence de vues et d'intérêts (1974-1982)	475
VII.2.2.2. Des lendemains qui déchantent (1982-2000)	481
VII.2.2.3. <i>Non Oxide Glass Society</i> : une initiative originale et des enjeux communautaires (1986-1998)	486
<i>VII.3. Le complexe scientifico-industriel : de la start-up à l'organisme supranational</i>	492
VII.3.1. Un projet militaire appliqué qui stimule la créativité chimique (1984-1986) ..	492
VII.3.2. De l'invention à la start-up : comment réussir un transfert technologique ?	496
VII.3.3. De la surveillance terrestre à la conquête de l'espace (2003-2015)	498
<i>Conclusion : Quelle recherche universitaire pour quelle société dans l'avenir ?</i>	502

Introduction

L'émergence des verres de chalcogénure au cours des années 1970 donne l'occasion d'une étude de cas exemplaire à plusieurs niveaux. Le laboratoire rennais à qui l'on doit la découverte initiale des « verres de fluorure » appartient à la communauté de chimie des solides (chapitre VI) tout en constituant une exception dans le paysage universitaire. D'abord étouffé, comme beaucoup d'autres, par le mandarinate des années 1960 (chapitre III), il se fait connaître à l'étranger puis se développe grâce aux financements et à la reconnaissance d'industriels. La découverte des verres de fluorure fédère rapidement au cours des années 1970 plus d'une vingtaine de laboratoires de recherche qui s'entendent et coopèrent autour de la mise au point de matériaux nouveaux pour les télécommunications. Ainsi les années 1980 voient fleurir une communauté hybride associant laboratoires universitaires, industriels privés et organismes d'État à vocation appliquée. Les ressorts d'une telle communauté sont complexes mais leur étude permet de dessiner un nouveau portrait de la recherche scientifique à la fin du millénaire.

Ce chapitre conte cette aventure contemporaine, qui entremêle de multiples lieux d'action, de capital et de pouvoir : paillasse, start-up, laboratoire, banque, communautés scientifiques, multinationales, organismes d'État, organisations supranationales. Par leur taille et leur influence croissantes, ces divers lieux permettent de revisiter la société contemporaine d'une manière originale, de redécouvrir des liens certes connus, mais, souvent plus décrits à l'aide d'une rhétorique incantatoire que par une analyse circonstanciée. Le laboratoire constitue le point de départ de l'aventure scientifique mais aussi, par un mouvement cyclique, le nœud de convergence des intérêts industriels qui l'entretiennent. Même si, à nouveau, la communauté incarne le rôle principal du drame, son action ne cesse de rebondir entre sphères industrielles et universitaires, démultipliant ainsi les identités des acteurs humains de cette histoire.

Je centrerai d'abord le récit sur le laboratoire rennais, nœud initial, en le situant dans le milieu qui le fait vivre durant les années 1960 : la chimie du solide française en train de se constituer (VII.1). Dans un deuxième temps, à l'aide d'outils statistiques simples, je décrirai quelques caractéristiques de la communauté « hybride » des verres non conventionnels qui se met en place à partir des années 1970 puis évolue durant les deux dernières décennies du siècle (VII.2). Enfin, je saisirai l'occasion d'une deuxième « découverte » du laboratoire rennais pour relier de manière transversale les multiples lieux d'action, de capital et de pouvoir qui servent de trame au « complexe scientifico-industriel » contemporain (VII.3).

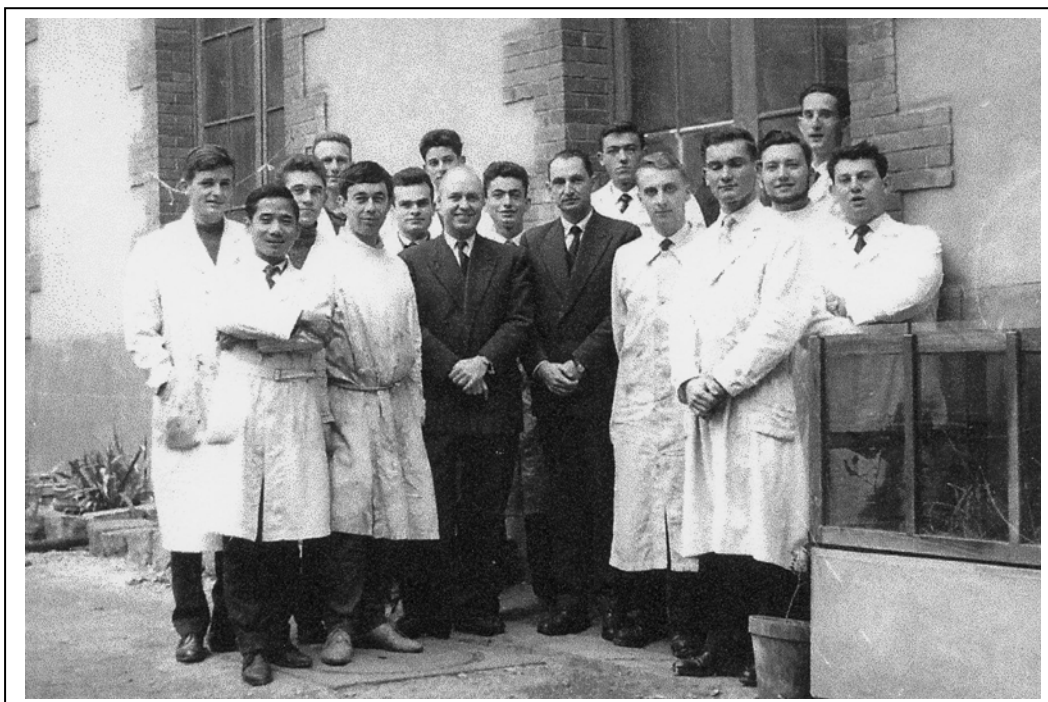
VII.1. Un laboratoire rennais, de la chimie du solide aux verres de fluorure

VII.1.1. Les « Rennais » : Rohmer, Hagenmuller, Prigent et compagnie (1950-1975)

À Rennes, au début des années 1950, la faculté des sciences coule des jours paisibles le long de la Vilaine, près du centre historique. La chaire de chimie minérale est occupée par Raymond Rohmer, l'un des premiers thésards de Chrétien à Strasbourg, avant-guerre [Chrétien, 1950]. Fidèle parmi les fidèles, c'est lui qui sera choisi parmi les anciens élèves pour prononcer le discours du *Jubilé* de Chrétien en 1973. À cette occasion, il place quelques bons mots alsaciens et latins évoquant la terre natale et la foi du maître [Rohmer, 1973]. De 1950 à 1956, Rohmer dirige le Laboratoire de chimie minérale (qualifié de « A » par la suite) dans la tradition de la *Chrétienté* (III.2.1.1) en s'orientant vers les solides. Il privilégie en particulier les « bromures d'uranium ». L'équipement du laboratoire – spécifié pour 1956 – n'a rien à envier à la chimie des hautes températures (V.1) et comporte entre autres des « fours permettant d'atteindre 2.300°C », des « thermobalances » et des « appareils de rayons X avec densitométriques ». Trois ou quatre scientifiques y travaillent, soit un tiers de la chimie rennaise en 1956 (ils sont quatorze pour un laboratoire de chimie minérale et deux de chimie organique). Parmi eux, un jeune « assistant », Jacques Prigent termine sa thèse [MIN, 1956, Rennes]. Mais Rohmer a le mal du pays : alsacien de naissance et de cœur, il n'aspire qu'à rentrer et quitte la Bretagne dès qu'il obtient un poste de professeur à Strasbourg en 1956. À l'automne, Hagenmuller, de retour de Saïgon, est nommé maître de conférences à Rennes (IV.1.3) pour services rendus à l'administration française en Indochine puis au Sud Vietnam. Après avoir terminé sa thèse, Prigent lui-aussi est bientôt promu maître de conférences.

Deux équipes de recherche vont donc coexister quelques années : l'une, plus dynamique et plus nombreuse, sous la férule de Hagenmuller, compose le service de chimie minérale A ; l'autre, plus discrète, sous la direction de Prigent, compose le service de chimie minérale B. Malgré ces distinctions administratives, la répartition des étudiants est assez floue,¹ comme le suggère la photographie ci-dessous datant de 1960 :

¹ « On était là comme des petits gars, dix ou douze autour de lui, et il choisissait : "vous, Rouxel, vous, ... vous venez avec moi." Puis moi j'étais là et il me dit : "Lucas, vous allez rester à Rennes avec Prigent." Il avait besoin de quelqu'un de son école qui monte quelque chose à Rennes, je l'ai pris comme ça aussi, je me suis dit aussi, "ouf ! le monstre déménage, je n'aurai plus à me le taper tous les jours" (rires), parce que ses colères ! » [I Lucas, 2005, p. 4]. « Au début, dans les vieux locaux de la faculté de Rennes, **sur les quais de La Vilaine**, il y avait les laboratoires Hagenmuller et Prigent » [p. 3] puis « Si l'on regarde la photographie des laboratoires Prigent et Hagenmuller vers 1960, on voit les deux élèves de Prigent : Jacques Lucas (professeur) et Caillet maître de conférences (ou peut-être est-il professeur) tous les deux à l'université de Rennes. Tous les autres sont des élèves de Hagenmuller [I Tournoux, 2006, p. 18]. Hagenmuller exagère sa prédominance institutionnelle et son rôle dans la formation de Lucas : « Il y a Lucas à Rennes [...] Il a été mon élève pendant deux ans lorsque j'étais à Rennes, quand je suis parti, je l'ai laissé avec mon ami Jacques Prigent. J'avais aidé Prigent à terminer sa thèse quand je suis arrivé à Rennes, en 1956. » [I Hagenmuller, 2004, p. 5]. « JL : En fait, Hagenmuller était très occupé avec toutes ses activités, il n'avait pas le temps de s'occuper de moi et m'avait placé avec un des maîtres de conférences de Rennes Il s'appelait Jacques Prigent » [I Lucas, 2005, p. 4].



La chimie minérale rennaise (1960).

de gauche à droite : Jacques Lucas, Nguyen van Hye, Michel Pouchard, Antoine Hardy, Bernard Le Neindre, Roger Naslain, Jean Rouxel, Paul Hagenmuller, Michel Tournoux, Jacques Prigent, J. David, André Lecerf, Chopin, Caillet, Maurice Rault, Debray.

Si on compare avec la photographie du groupe Hagenmuller (IV.4.1), il semble que Paul ait pris l'ascendant sur Jacques, ne lui laissant que deux ou trois étudiants. En 1959, Hagenmuller est promu professeur mais n'obtient toujours pas la chaire de chimie minérale que l'*intelligentsia* rennaise hésite à confier à un homme aussi iconoclaste. L'année suivante, il préfère partir pour Bordeaux où on lui fait un pont d'or (IV.4.1). Il a néanmoins bousculé les tranquilles habitudes de Rennes des années 1950 par un enseignement novateur et la direction musclée de son équipe. Ce faisant, il a attiré dans la filière SPCN d'excellents étudiants séduits par le personnage. Fascinant, le professeur Hagenmuller a suscité de multiples vocations en transmettant le « virus » de la recherche. Par son passage, il a favorisé l'essor de la chimie de l'état solide à Rennes.²

² « En tant qu'étudiant, je trouvais les professeurs peu motivants sauf un professeur de chimie organique qui s'appelait Levas. J'ai travaillé et j'ai fini premier de la filière SPCN (Sciences Physiques Chimiques Naturelles). Sans lui, je pense que je serais parti dans l'industrie. Entre-temps, en 1956, est arrivé à Rennes un personnage assez anormal [...] Paul Hagenmuller. Il commençait à développer la chimie du solide et m'en donna le virus. [...] Il venait en travaux pratiques et demandait aux étudiants ce qu'ils voulaient faire par la suite. Quand il m'a posé la question de mon avenir, je lui ai répondu – je ne savais pas très bien en fait – que je voulais intégrer une école d'ingénieur ou de géologie. Il m'a très vite fait comprendre que j'allais me faire "bouffer" par les polytechniciens. Je ne savais même pas encore ce que c'était. Hagenmuller était très persuasif, il m'a proposé un poste et comme je n'avais pas de soutien financier de ma famille, j'ai commencé à faire une thèse dans son laboratoire. » [p. 2] « "si Hagen n'était pas passé à Rennes, je n'aurais sans doute pas fait cette carrière, je ne sais pas où je serais." Je dois ma carrière à la personnalité de ce mec-là, je souhaite à tous les étudiants de connaître cette fascination. » [I Lucas, 2005, p. 7].

Hagenmuller parti, Prigent se retrouve avec seulement deux étudiants : P. Caillet et Jacques Lucas. La Vilaine reprend un cours plus tranquille après le départ du « phénomène ». Au Laboratoire de chimie minérale B, Prigent poursuit et diversifie l'étude des sels d'uranium entreprise par Rohmer. Il s'intéresse à d'autres halogénures et oxy-halogénures d'uranium mais aussi aux composés du tungstène. À Lucas l'uranium, à Caillet le tungstène. En 1964, après six ans de travail, Lucas présente une thèse sur les « Préparations, propriétés et étude infrarouge de sels complexes halogénés et oxyhalogénés des ions uranyle, diuranyle et triuranyle ». La méthode qu'il a adoptée est conforme à l'air du temps pour l'étude des solides minéraux : dosage chimique, préparation à quelques centaines de degrés, suivi thermogravimétrique, étude des liaisons par IR (en solution) et diffraction des rayons X pour obtenir la structure des sels d'uranium.³ Son jury se compose de Prigent (président), Rohmer, Hagenmuller, J. Mevel (professeur de physique à Rennes) et Jean Lang (professeur de chimie à Rennes) [Lucas, 1964]. En 1966, Prigent a structuré son laboratoire de sept personnes suivant deux « sections » autour de ses deux lieutenants : « chimie uranium » (Lucas) et « chimie tungstène » (Caillet). D'autres étudiants l'ont rejoint au cours des années 1960 : J.-C. Levet, M. Gueguin [MIN, 1966, p. 260-261], Jean Padiou qui soutient une thèse [1969] ainsi que Marcel Sergent [1969]...

À la faculté des sciences encore, un autre fils de la *Chrétienté*, Lang, a monté un deuxième laboratoire de chimie minérale – le « C » –. D'abord intéressé par les sels en solution, il se tourne rapidement vers l'étude des solides. Daniel Grandjean, plutôt cristallographe, y a aussi été promu professeur. Enfin, Dominique Weigel, qui vient de l'Institut de recherches sur la catalyse (Lyon), est nommé maître de conférences. Il dirige un petit Laboratoire de chimie générale B (trois personnes), qui affiche des recherches pour moitié en chimie minérale et pour moitié en physique du solide [MIN, 1966, p. 258-260]. Rennes est en train de devenir l'un des nœuds importants de la chimie du solide française, un centre diversifié, productif et original. En 1975, l'unité d'enseignement et de recherche (UER) « structures et propriétés de la matière » regroupe trois laboratoires de chimie minérale (Prigent, Lucas, Lang) et un de « cristallographie » (Grandjean) [MIN, 1974, Bretagne]. Ces quatre laboratoires sont fédérés en une unité associée au CNRS de « chimie et cristallographie d'éléments de transition » (dirigée par Prigent) [CNRS, 1975, 1975b]. Par la suite, cette unité CNRS deviendra le « Laboratoire de chimie du solide et inorganique moléculaire », qui comprend cent cinquante personnes et six laboratoires vers 1990 [NOGSn, 1991, n°31, p. 1].

C'est à Rennes encore qu'au début des années 1970, Prigent, Sergent et leur étudiant Raymond Chevrel synthétisent les premiers « clusters » à base de sulfures de molybdène ternaires (PbMo_6S_8), qu'ils présentent comme de « nouvelles phases » dans le *Journal of Solid State Sciences* [Chevrel & al., 1971]. L'année suivante, une équipe des *Bell Labs*, dirigée par Bernd Matthias, re-synthétise ces clusters et les déclare « *high temperature superconductors* » dans *Science* [Matthias & al. 1972]. L'affaire des « phases de Chevrel »⁴ est racontée dans [Matricon & Waysand, 1994, p. 307-308] du point de vue de la physique. Par la suite, Sergent et ses

³ « Peu importe [le directeur de thèse : Prigent], je n'étais pas maître de mon sujet, j'ai fait une thèse très classique sur des sels d'uranium, que j'ai présentée en 1964. [...] puis j'ai complètement changé de sujet de recherche » [I Lucas, 2005, p. 4]. Une nouvelle fois, il me semble que le chercheur mature a tendance à sous-estimer le rôle de son directeur de thèse et l'importance de son sujet de thèse pour la suite. Ceci est dû à un double effet : psychologique pour l'individu, qui veut affirmer son autonomie ; historiographique de ma part car en me focalisant sur les thèses, je surestime leur rôle.

⁴ « À Rennes, après le départ d'Hagenmuller et la mort de Prigent, les deux personnalités les plus marquantes furent Marcel Sergent et Jacques Lucas [...]. Sergent est à l'origine de la découverte des « phases de Chevrel », improprement nommées d'après le nom de son étudiant. Mais la dénomination des matériaux dans un article est parfois popularisée par les Américains qui ont tendance à choisir le premier nom de la publication. » [I Tournoux, 2006, p. 18].

collaborateurs continueront à travailler sur la chimie des clusters [Chevrel & al., 1999, p. 461]. On peut facilement imaginer qu'une telle densité d'équipes de recherche en chimie du solide suscitera concurrences et tensions vis-à-vis des étudiants de l'université de Rennes. Par amphithéâtres interposés, les professeurs se livrent donc, là encore, une guerre d'influence pour essayer de convaincre les futurs doctorants. Un enseignant charismatique aura plus de chance d'y parvenir.⁵

VII.1.2. Un thème classique à la fin des années 1960 : les « pyrochlores »

À la fin de sa thèse, Lucas ne part pas en postdoc à l'étranger (cette coutume ne se répand, chez les chimistes, qu'à la fin des années 1960). En revanche, comme la plupart des citoyens majeurs, il doit effectuer son service militaire. Comme peu d'entre eux, il devient scientifique du contingent : envoyé à l'École centrale, qui ne dispose pas de laboratoire de chimie, le jeune docteur est redirigé vers le centre CEA de Saclay où, en pratique, il co-dirige des centraliens en thèse. Affecté au laboratoire des fluorures, il profite de l'aubaine pour apprendre la chimie des fluorures et écrire plusieurs publications au contact d'étudiants motivés et brillants dans un contexte peu directif. C'est très probablement son sujet de thèse sur les halogénures d'uranium qui a favorisé une telle affectation.⁶ On retrouve une nouvelle fois l'importance de la thèse pour la suite de la carrière. Après deux ans d'un service militaire très fructueux, Lucas obtient directement un poste de « professeur », à Rennes. Prigent et (surtout) Hagenmuller ont fait jouer leurs relations pour que ce jeune homme d'à peine vingt-neuf ans fonde un nouveau laboratoire de chimie minérale, le « D ».⁷

À partir de 1966, désormais seul au commandement, le jeune chercheur se fixe sur un sujet de recherche : s'appuyant sur sa bonne expérience au CEA, il reste sur les halogènes et propose à son premier étudiant officiel, Jean Pannetier, une thèse sur les « pyrochlores »*. La structure pyrochlore est l'équivalent pour les halogènes des spinelles pour les oxydes – tout comme la fluorine* est l'équivalent de la structure pérovskite* –. Sa formule générale est $A_2B_2X_6X'$ (avec A= Ca, Na, Pb..., B= Nb, Ti... X=O, X'=F, OH...) [I Lucas, 2005, p. 3].

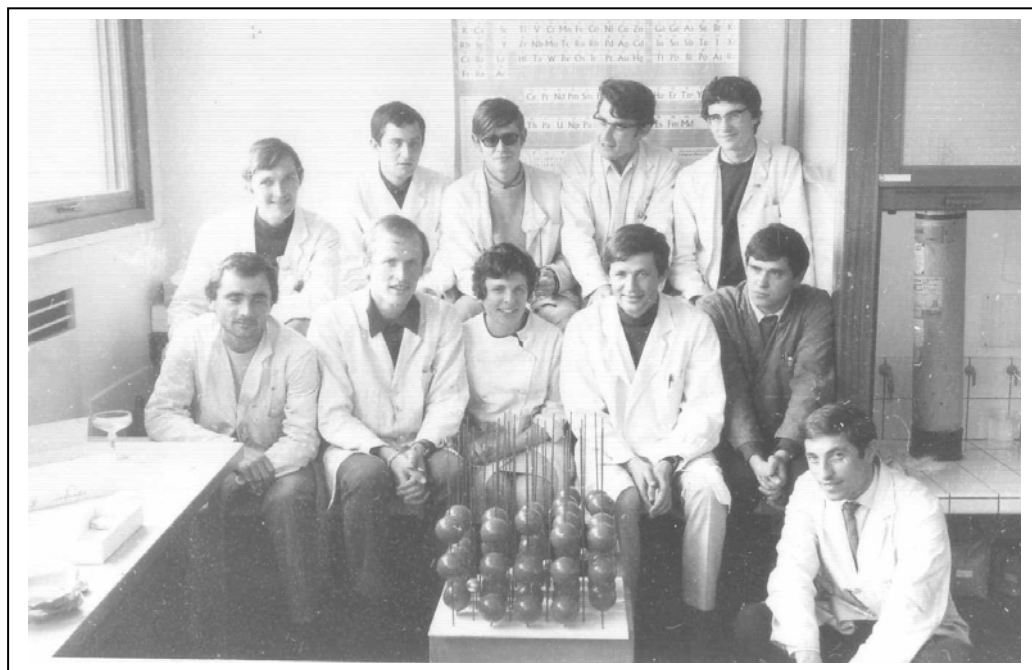
⁵ « comment je suis arrivé dans ce laboratoire ? C'est très clairement du fait de la personnalité de Jacques Lucas. Je suis né ici, j'ai toujours habité en Bretagne, c'est donc assez naturellement que je suis venu à Rennes. Sur Rennes, il y avait deux professeurs en chimie du solide que je percevais comme d'excellents pédagogues : Daniel Grandjean et Jacques Lucas. – PT : Avant de choisir, vous êtes allé voir les deux ? – JA : Oui, je suis allé voir les deux. Les sujets sur les verres me plaisaient plus mais c'est surtout – j'en reviens à la personnalité de Jacques Lucas – la façon dont ça m'a été présenté, il sait rendre les choses attrayantes. » [I Adam, 2006, p. 1].

⁶ « J'avais fait mon service militaire pendant deux ans de 1964 à 1966. J'ai eu un coup de chance d'être à l'École centrale, qui n'avait pas de laboratoire. Ils m'ont envoyé au CEA à Saclay où je suis tombé dans le laboratoire des fluorures, de la diffusion gazeuse qui étudiait l'hexafluorure, UF_6 . C'était aussi parce que j'avais travaillé pendant ma thèse sur l'uranium. Je me suis retrouvé docteur ès sciences là-dedans pour un an et demi, je me suis dit que si je pouvais rester un peu plus, tant mieux. J'avais aussi la chance d'avoir des centraliens en thèse. Leur patron, un professeur hongrois, Kikendaï, était un type très sympa mais qui visiblement était bien content d'avoir trouvé quelqu'un pour s'occuper de ces centraliens. J'ai fait un service militaire comme peu de gens en ont fait : j'ai dû écrire cinq ou six publications pendant mon service, j'avais du haut de gamme avec les centraliens qui travaillaient sur des sujets que j'avais concoctés pour leur sujet de thèse. J'ai appris la chimie des fluorures. » [I Lucas, 2005, p. 4].

⁷ « En 1966, quand j'ai fini mon service – j'avais vingt-neuf ans –, c'était le démarrage des universités de Rennes, Nice... Hagenmuller, qui avait dû combiner ça avec d'autres professeurs parce que moi j'avais autre chose à faire, je jouais au tennis, me dit : "Lucas, vous avez trois possibilités pour un poste de professeur – je me suis dit mince pour un poste de prof c'est un peu tôt – soit vous allez à Brest – je savais que c'était l'enterrement – soit vous allez à Nice mais Hagen me dit, vous allez devoir tout monter, vous êtes un peu jeune, je vous conseille de rester à Rennes." Je suis resté à Rennes et j'ai monté mon propre labo » [I Lucas, 2005, p. 4].

Comme visualiser une structure cristalline dans sa tête n'est pas évident au début (certains n'y arrivent jamais), on utilise des modèles pédagogiques (annexe A.VII.1) composés de boules de couleur (symbolisant les différents atomes) et de barres (liaisons chimiques) pour matérialiser l'arrangement tridimensionnel des atomes.

Pannetier est brillant et d'autres étudiants rejoignent le laboratoire. Au début des années 1970, Lucas dirige déjà une dizaine de personnes (avec une fille seulement) travaillant sur les pyrochlores. La photographie ci-dessous est amusante : elle montre le onze de l'équipe Lucas avec la structure pyrochlore en guise de ballon !



Malgré l'humour et l'enthousiasme de la jeunesse, il n'est pas facile de trouver un thème original. À Bordeaux, une équipe (d'abord dirigée par De Pape) travaille sur les « composés fluorés » et produit déjà une thèse par an à la fin des années 1960 : Jean Ravez (1968), Alain Tressaud (1969), Jacques Roux (1970), Jean Grannec (1970)... [Hagemuller, 1977, p. 99-100]. À Vitry-sur-Seine aussi, Collongues veut comprendre l'« ordre de défauts dans les structures fluorite » et son groupe – autour de la thèse de Daniel Michel (1964-1971) – publie six articles sur le sujet entre 1963 et 1976. L'une des applications potentielles des ces matériaux est la « jauge à oxygène » [Collongues, 1979, p. 14, 34]. La transition fluorine → pyrochlore lui paraît particulièrement intéressante [I Lucas, 2005, p. 4]. Les fluorures binaires ou ternaires intéressent aussi les chimistes du Mans (Laboratoire des fluorures et oxyfluorures ioniques, fondé par de Pape avant 1970), de Montpellier (chimie minérale C) et les physiciens du LEPM (Grenoble) [RA CNRS, 1968 ; 1970 ; 1971, p. 203]. Les pyrochlores, sujet porteur à la fin des années 1960, donnent lieu à une recherche coopérative sur programme du CNRS (n°219). Si un recouvrement thématique avec Bordeaux peut conduire à des rapports houleux, c'est avec beaucoup de plaisir que Lucas collabore avec Collongues et Perez y Jorba. Il est en train de devenir son ami. Il l'invite, ainsi que Bertaut, lors de la soutenance de thèse de Pannetier.⁸

⁸ « très bêtement peut-être ou de manière très logique, j'ai commencé des sujets sur les fluorures un peu complexes. Hagen faisait la même chose à Bordeaux » [p. 5] et « Pendant cinq ans, j'ai travaillé avec lui [Collongues] et Mme Perez sur des pyrochlores. » [p. 1]. « À la première thèse de mon laboratoire, celle de Jean Pannetier sur les pyrochlores, j'ai invité Collongues et Bertaut et on a discuté. » [I Lucas, 2005, p. 7]

Diverses études sont ainsi menées à Rennes en vantant les propriétés physiques des pyrochlores pour attirer les contrats. Le CNRS ou les industriels comme la Compagnie générale d'électricité (CGE) financent ainsi des projets du laboratoire dans l'intention de parvenir à des applications en « pyroélectricité » et en optique « laser ».⁹

Durant les premières années du Laboratoire de chimie minérale D (1966-1972), Lucas et ses étudiants se mettent au diapason de la communauté française sous le regard amical de Collongues et sévère de Hagenmuller. Ils suivent à la lettre le « bréviaire » cristallographique pour étudier les pyrochlores : synthèse de monocristaux à haute température ; caractérisations structurales par diffraction de rayons X ; intérêt pour les propriétés physiques (pyroélectricité et optiques) et pour les applications potentielles (lasers) ; enfin collaboration avec les industriels (CGE) pour obtenir de l'argent et avec les physiciens (Bertaut) pour mieux comprendre la physique.¹⁰

VII.1.3. Du cristal au verre : entre « sérendipité », intuition et engouement industriel (1972-1974)

Au laboratoire Lucas, Marcel Poulain essaie, durant sa thèse financée par le CNRS, de synthétiser un cristal de fluorozirconate (association de fluorure de zirconium avec d'autres fluorures) « dans l'espoir de faire un complexe très riche en terres rares » [I Lucas, 2005, p. 4]. Ce sujet s'inscrit à la conjonction de trois mouvements : local – spécialisation du laboratoire sur les fluorures (VII.1.2) – ; communautaire – la zircone a été très étudiée en chimie des hautes températures (IV.3.1, V.1) – ; et industriel – il s'agit d'obtenir un phénomène laser intéressant par ajout massif de terres rares, ce que fera le LCAES plus tard (IV.3.3) –.

Poulain mélange les ingrédients, les place dans un tube qu'il scelle pour éviter l'oxydation des fluorures à l'air. Ensuite, il chauffe le tube scellé à haute température puis laisse refroidir. Un jour, à l'ouverture d'un tube scellé, il récupère un gros solide, long d'un centimètre, qui contraste par sa taille avec les petits cristaux millimétriques habituels. L'inhabituel intrigue le thésard. Lucas est averti, on passe le solide à la diffraction des rayons X : rien, le solide ne diffracte pas ! Tout cristallographe sait que le diagramme blanc de rayons X est caractéristique d'un amorphe : le produit de la réaction doit être un verre, sans intérêt donc. C'est probablement la première pensée du thésard : cherchant à fabriquer des monocristaux, que ferait-il d'un verre ? Moins collé à la paille, Lucas a d'autres perspectives : directeur de laboratoire, il cherche de nouveaux thèmes de recherche. Or, il ne

⁹ « Avec Collongues, nous avons travaillé sur un projet avec Alcatel (alors Compagnie Générale d'Électricité) sur la thématique des pyrochlores, sur la synthèse de monocristaux pour des applications en pyroélectricité et laser. » [p. 3]. « dans un projet sur les fluorures sur lequel j'avais obtenu des crédits du CNRS, il s'agissait de faire des micro-lasers. C'était très voisin de ce que fait Vivien en fait, l'idée était de dire : dans ces matériaux qui sont des fluorures complexes, il faut mettre beaucoup de terres rares – d'ailleurs ça s'est vérifié – si bien qu'on doit avoir des rendements quantiques en émission suffisamment forts. Or, à l'époque, dans les années 70, les physiciens rêvaient d'avoir des tous petits lasers pour voir si on pouvait obtenir de la lumière dans des configurations de confinement extrêmement fortes. – PT : *Ca a marché ?* – JL : Un peu » [I Lucas, 2005, p. 5].

¹⁰ « JL : On a marché comme tous les autres au début : caractérisations par rayons X, c'est-à-dire étude des structures. Il y avait une RCP à l'époque qui s'appelait « structure-propriétés ». Avec Collongues, on faisait les matériaux, on étudiait la position des atomes dans l'espace et on écrivait une publication dans *Acta Crystallographica*, le bréviaire (rires). Si on avait les moyens, on faisait une mesure physique : si on avait mis des terres rares, on faisait une mesure en émission, si on avait fabriqué un matériau infrarouge, on faisait un spectre en transmission. On caractérisait physiquement les matériaux, c'était l'école de chimie traditionnelle de Collongues – on fonctionne toujours comme ça d'ailleurs – on fabriquait les matériaux à l'équilibre. » [I Lucas, 2005, p. 15].

lui semble pas avoir entendu parler ou lu quelque chose sur des verres fluorés. Les verriers sont des gens traditionnels travaillant sur les matériaux que la nature leur a donnés, la silice, du sable qu'ils chauffent à très haute température pour obtenir des verres.¹¹ La plupart des verres usuels sont des oxydes. Un peu de bibliographie confirme l'intuition de Lucas : il ne trouve aucun verre à base de fluor mentionné dans la littérature scientifique.¹² Or, l'un des désirs du chimiste – par opposition au physicien par exemple – est d'être « original » en synthèse, et fabriquer de nouveaux matériaux est l'une de ses grandes fiertés.¹³ Le prof et son thésard sont donc très contents. Ils retravaillent la synthèse des verres, leurs caractérisations et publient. Nous sommes en 1972-1973 : deux chimistes rennais ont fabriqué des « verres de fluorure » inédits et avertissent la communauté universitaire de chimie du solide et des matériaux en publiant dans le *Materials Research Bulletin*. Hagenmuller et Art Sleight, un chimiste américain que Lucas connaît bien, de sa génération, en sont éditeurs associés.

Les choses auraient pu en rester là : un cas de « sérendipité », un solide original, quelques articles plus ou moins lus, un entrefilet dans le rapport d'activité du CNRS, des séminaires, une médaille... Une indifférence polie de la communauté. Ce non-événement semble caractériser la communauté des *solidistes* français. On avance, on produit, on progresse mais dans une sorte d'indifférence générale. Les mandarins ont tendance à écraser les émergents tandis que, pendant ce temps, ailleurs...

Au début des années 1970, le défi des télécommunications c'est la « fibre optique », qui permet de propager des signaux optiques et, donc, de l'information sur de longues distances. La silice est largement utilisée puisqu'elle est transparente aux ondes et peut facilement être mise en forme. Pourtant, elle ne satisfait pas pleinement parce que le signal est atténué sur une longueur de quatre-vingts kilomètres. À intervalles réguliers (quelques dizaines de kilomètres), il faut placer des générateurs qui amplifient le signal avant qu'il ne soit complètement atténué. Ce système de répétition n'est pas idéal sur de grandes distances, pour traverser les océans par exemple. Les interprétations physiques attribuent cette atténuation à la liaison chimique silicium-oxygène, qui induit des modes de vibration (phonons) trop serrés. Les Laboratoires Bell, qui mènent alors une recherche de haut niveau orientée vers les applications, battent la campagne. Des théoriciens du groupe ont pensé qu'il suffisait de remplacer la liaison Si-O par une liaison du type Si-F, ce qui permettrait de gagner deux ordres de grandeur en énergie, soit un ordre de grandeur en distance. Des répéteurs tous les mille kilomètres, ce serait déjà plus confortable. Autre problème qui se profile : la « largeur spectrale » de la silice est faible, elle "coupe" (atténue rapidement) le signal de part et d'autre du visible dans l'ultraviolet et dans l'infrarouge. Même si la fenêtre est confortable, elle pourrait devenir insuffisante. En effet, les stratèges des télécoms s'inquiètent à propos des

¹¹ « Avec la silice, on n'avait rien inventé, elle existe depuis longtemps dans la nature. » [p. 6] « le domaine du verre, ce sont des gens extraordinairement traditionnels comme Saint-Gobain : en dehors de la silice, ils ont peur (rires). » [I Lucas, 2005, p. 15].

¹² « ce qui nous a paru bizarre, c'est autre chose. [...] Un jour en ouvrant un tube scellé, on est tombé sur un solide gigantesque pour nous (de l'ordre d'un centimètre), complètement anormal. Le doctorant sur ce sujet, Marcel Poulain, le passe aux rayons X puis me dit : "rien ! il ne diffracte pas, pas de spectre. Je ne comprends pas, ça doit être du verre, ce n'est pas un monocristal, personne ne s'intéressera à ça." Là je lui dis : "fais gaffe, j'ai l'impression qu'on a mis la main sur un truc un peu bizarroïde, c'est du verre avec des fluorures, personne n'a jamais vu ça", on connaissait le verre à base de silice, les silicates. Avec Marcel Poulain, on a travaillé, on a bien cerné le truc et on s'est aperçu que personne n'avait jamais fait de verres de fluorure » [I Lucas, 2005, p. 5].

¹³ « je trouve que les physiciens ont un comportement beaucoup plus moutonnier que les chimistes, je veux dire par là que ça ne les gêne pas de tous faire la même mesure, sur le même matériau, en même temps. J'ai vu des congrès sur les métaux organiques, il y avait quatre cents physiciens et deux cents avaient fait la même mesure, sur le même matériau. Quand on pose la question, ils disent qu'elle n'est pas faite de la même façon, chacun persuadé de faire la mesure mieux que les autres (rire). C'est quelque chose qui n'existe pas en chimie, on est plus jaloux d'originalité, ça c'est une grosse différence. » [I Moradpour, 2006, p. 4-5].

débites nécessaires dans un monde de plus en plus câblé, où l'obsession de la vitesse taraude fournisseurs et consommateurs. Comment transmettre toujours plus d'informations alors que les processeurs numériques ne cessent d'accroître leur vitesse ? Élargir la bande passante devient l'idée fixe de certains.¹⁴

De même qu'on parle de veille technologique, on exerce aussi une veille scientifique : les chercheurs et techniciens R&D parcourent régulièrement la littérature scientifique à la recherche d'idées, de composés chimiques, de phénomènes physiques, de procédés. Faire sa bibliographie, c'est comme faire son marché aux ingrédients avant de préparer les inventions. Quand les publications rennaises tombent sous les yeux des guetteurs des télécoms, ils ont un pic d'adrénaline ! La synthèse chimique réalisée donne enfin l'occasion de vérifier ce que la théorie a suggéré, de voir si les « verres de fluorures » permettent simultanément de diminuer l'atténuation d'un facteur deux et d'élargir la bande passante à de nouvelles fréquences. La découverte de verres de fluorure soulève donc de grands espoirs (commerciaux) et constituent une aubaine (scientifique).

L'affaire change soudain de dimension lorsqu'elle passe de la communauté scientifique provinciale aux grandes multinationales. La « chaumière bretonne » est littéralement prise d'assaut par les plus grosses sociétés industrielles occidentales des télécoms. Ce qui intéressait médiocrement les universitaires provoque une ruée chez les industriels. Les verres de fluorure, parfois nommés improprement « verres fluorés », ont désormais une carrure internationale. Doit-on présenter l'affaire comme la découverte d'« une nouvelle famille de matériaux » (qui n'attendait que la science pour advenir) ou comme l'invention contingente d'une communauté sous les pressions diverses de chercheurs, de marchands et de politiques ?¹⁵

¹⁴ « C'était parallèlement l'époque du développement des fibres optiques. Les gens des télécommunications de l'autre côté étaient en train de développer leurs fibres de silice, les transmissions de signaux dans les fibres... Il y avait aussi des types qui regardaient à plus long terme. [...] On savait que la silice avait une limitation intrinsèque : elle ne pourra jamais transmettre des signaux plus loin que 80 km simplement parce qu'il y a une atténuation qui est liée à liaison silicium-oxygène. Quelques types géniaux de *Bell Labs* s'étaient dit que s'il existait d'autres verres avec des modes de vibration plus relâchés, c'est-à-dire des énergies de phonons plus grandes, on pouvait penser que les pertes optiques par transmission allaient reculer même de beaucoup puisque les calculs théoriques montraient qu'il était possible de gagner deux ordres de grandeur en énergie d'atténuation, soit un ordre de grandeur en distance. Au lieu de transmettre l'information sur 80 km sans régénérer le signal, il devenait possible de la propager sur près de 1000 km. Un type fait la bibliographie et voit nos verres dans un article du *Materials Research Bulletin*, une revue dont Art était éditeur et qui aimait bien que je lui envoie des papiers. En l'espace de six mois, ce fut la révolution dans la chaumière bretonne : jusque-là, notre petit laboratoire faisait sa synthèse tranquille et commençait à être connu parce qu'il était créatif dans la petite famille des chimistes du solide mais il restait sous l'emprise de Hagenmuller qui savait nous rabaisser parfois, et là soudain parce que des types qui font des modélisations disent : "c'est potentiellement les verres du futur", le petit laboratoire devient la cible de toute la communauté internationale des télécommunications. » [I Lucas, 2005, p. 6] « Il fallait augmenter le débit et les verres de fluorure pouvaient apporter des solutions en permettant notamment d'amplifier les signaux sur une plus large bande spectrale que la silice. Pendant 15 ans, on a été en contrat permanent avec Alcatel ou l'Union européenne pour développer de nouvelles générations d'amplificateurs à fibres pour les nouvelles bandes de *télécoms*. » [I Adam, 2006, p. 3].

¹⁵ « à l'époque, on appelait ça des verres fluorés mais c'est impropre –. Chimiquement, ça a été une découverte tout à fait inattendue mais assez grosse parce qu'on était en train de découvrir une nouvelle famille de matériaux. Dieu sait si dans la chimie du verre, on peut en rajouter, c'était des sujets illimités. C'était dans les années 1972-73. » [I Lucas, 2005, p. 5].

VII.2. Émergence d'une communauté « hybride » : une illustration de la « triple hélice » université-industrie-État

VII.2.1. Du solide chimique aux matériaux télécoms : virages techniques et sociaux du laboratoire des années 1970

Le laboratoire dirigé par Lucas attire plusieurs multinationales des télécoms. L'année 1973-1974 constitue un pic d'effervescence. Les visites de "courtoisie" se succèdent pour faire la connaissance des fluorures de zirconium. En l'espace de quelques mois, le laboratoire rennais reçoit la visite de Corning, Bell Telephone, British Telecom, NTT (Nippon Telephone and Telegraph), KDD (Kokusai Denshin Denwa Co., Ltd), Hoya Corporation, le Centre national des études en télécommunications (CENT, qui est le centre de recherche des Postes et Télécommunications)...¹⁶ Sans avoir maîtrisé autre chose que la synthèse chimique, le Laboratoire est emporté vers de nouveaux horizons, insoupçonnés seulement deux ans plus tôt. Lucas a compris que les fluorures de zirconium constituent un « coup de chance » – dont sa carrière, dit-il, est jalonnée [I Lucas, 2005, p. 1] – et que désormais les verres fluorés vont représenter l'axe majeur de son programme de recherche. Ce virage a deux séries de conséquences importantes et quasi-immédiates pour le Laboratoire : l'une technique, l'autre sociale.

Il s'agit désormais pour les solidistes de travailler sur des verres destinés à l'optique. Synthèse et caractérisations sont bouleversées. La caractérisation des amorphes n'a rien à voir avec celle des cristaux. La diffraction des rayons X, qui donne des spectres blancs pour les verres (VII.1.3), est rapidement abandonnée et les appareils sont donnés à d'autres laboratoires. En adoptant les techniques des verriers traditionnels, l'équipe se tourne vers la « calorimétrie », en particulier l'analyse thermique différentielle (ATD). Premièrement, celle-ci permet de caractériser un verre en mesurant sa température de transition vitreuse, T_g (le « g » signifiant « glass », soit « verre » en anglais). La transition vitreuse – qui n'est pas une transition de phase au sens thermodynamique du terme – marque le passage d'une phase désordonnée mais fluide (au-dessus de T_g) à une phase désordonnée mais figée (ce qu'on appelle le verre, qui est solide).

Deuxièmement, l'ATD donne une idée du degré de cristallisation du verre. En effet, comme le verre est un état métastable (thermodynamiquement instable mais dont la cinétique est lente), il a tendance à cristalliser. Au cours de la synthèse surtout, l'accélération de la cinétique peut conduire à la formation de « centres nucléants » (petites zones de matière cristallisée). Tout l'art du verrier consiste à éviter la formation de ces microcristaux au sein du verre. Dans le cas des applications optiques, les centres nucléants sont proscrits parce qu'ils diffusent la lumière. La calorimétrie différentielle, qui permet de repérer les changements d'état, indique un pic de cristallisation (au-dessus de T_g) qui est d'autant plus large que le volume cristallisé est important. Quand l'ATD n'indique plus de pic de cristallisation, le verrier a enfin réussi à fabriquer un verre non cristallisé. À cette fin, il doit jouer sur les conditions expérimentales : température de chauffage, vitesse de refroidissement, composition chimique... C'est l'art du « cuisinier à la paillasse ». Les débuts sont difficiles, on tâtonne, on essaie. Même si les inhomogénéités cristallines sont encore trop nombreux, les verres produits

¹⁶ « En moins d'un an, on voit arriver chez nous : Corning, Bell Labs, British Telecom, NTT (Nippon Telephone and Telegraph), KDD (Kokusai Denshin Denwa Co., Ltd), Hoya Corporation... En 1974, la côte du laboratoire est montée en flèche comme jamais on n'aurait pu l'imaginer » [I Lucas, 2005, p. 6].

ont une taille exceptionnelle pour qui vient de la chimie des cristaux : un kilogramme alors qu'un monocristal de quelques grammes relève de l'exploit. Collongues d'ailleurs n'en revient pas ! Quand l'échantillon passe en caractérisation optique, on s'aperçoit qu'il diffuse beaucoup. Il faut alors recommencer la synthèse en ayant soin de réduire les zones cristallines.¹⁷

La deuxième évolution instrumentale majeure concerne les propriétés optiques des matériaux, en particulier leur pouvoir de transmission. Quelle est la largeur de bande des ondes électromagnétiques que les verres laissent passer sans les absorber ? On trace les courbes de « transmission spectrale » de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible ($0,4\mu\text{m} < \lambda < 0,8\mu\text{m}$). Au niveau théorique, il faut aussi apprendre le « b.a.-ba » des ondes électromagnétiques, la propagation de la lumière dans un milieu matériel, les modes de propagation, la physique des phonons (vibrations du réseau), etc. D'abord parce que le pouvoir de transmission du verre est directement lié à ses possibilités d'applications. Ensuite parce que le professeur de chimie est invité à parler devant les gens des télécoms, des opticiens, des verriers, des physiciens du solide...¹⁸ Il faut alors pouvoir s'entendre et se comprendre.

Synthèse, caractérisation, instrumentation, théorie : le savoir-faire de l'équipe rennaise s'éloigne du « paradigme conventionnel » de la chimie du solide (III.2.2). Le laboratoire est en train d'opérer un virage social vers la nébuleuse des télécoms, un monde plein de promesses mais étranger et encore exotique pour les chercheurs rennais plus à l'aise dans les jeux académiques pour la reconnaissance nationale et internationale. Si Lucas est bien soutenu par Collongues, il a perdu les bonnes grâces d'Hagenmuller, qui n'est pas ravi d'un tel succès, si imprévu, alors qu'un groupe à Bordeaux travaille dans le domaine des fluorures. Au début surtout, le mandarin au sommet de sa puissance (IV.3.3) ne tolère pas cette réussite qui lui fait de l'ombre, personnellement et pour son laboratoire. Malgré sa renommée internationale, le laboratoire de rennes n'obtient pas facilement de postes CNRS ou universitaires. Être sur la « liste noire » d'Hagenmuller n'est pas toujours facile (Galy ou Raveau peuvent aussi en témoigner). De temps en temps néanmoins, un poste est accordé au laboratoire rennais – Collongues sans doute est là pour y veiller –. Par la suite, lorsque l'explosion des verres de

¹⁷ « Les rayons X ne servaient à rien puisque ça ne diffracte pas (amorphe). On a fait quelques structures comme ça mais on a donné nos appareils de rayons X. On a découvert que dans la science du verre, on ne pouvait pas se passer de la calorimétrie : un verre, c'est-à-dire un liquide figé hors d'équilibre – hors équilibre signifie danger absolu mais aussi privilège absolu – est caractérisé dans sa vie thermique par une transition qu'on appelle la transition vitreuse qui se produit à T_g . Au-dessus de T_g , c'est le bonheur absolu : le matériau n'est plus un solide mais devient un solide plastique. [...] j'allais voir Collongues qui avait du mal à sortir des cristaux d' 1cm^3 , et je lui montrais mes matériaux qui pesaient 1 kilo et qui étaient dopés au néodyme. Le danger quand même, ce sont les matériaux que l'on peut mettre en forme mais qui, passés une certaine température, ont tendance à se recombinaison par agitation thermique en espèces cristallines, thermodynamiquement plus stables. C'est un phénomène bien connu de tous les verriers qui s'appelle la nucléation à la croissance. Pour nous, c'est l'horreur parce que le verre se transforme tout à coup en cristaux, plus ou moins opaques, qui sont des centres diffusants de la lumière et qui n'ont plus les propriétés optiques qui nous intéressent. Pendant 2 ou 3 ans, nous sommes restés au purgatoire : nous avons des morceaux de verre honnêtes mais dès qu'ils passaient en transmission optique, les gens voyaient qu'ils étaient bourrés de centres nucléants. [...] Nous avons donc fait de la chimie pour trouver la bonne composition qui refuse de cristalliser : c'est un boulot de cuisinier à la paillassse ! On n'a que des guides intuitifs. » [I Lucas, 2005, p. 15-16].

¹⁸ « JL : On fait de l'optique de base : transmission spectrale – voir à partir d'où le matériau ouvre pour laisser passer la lumière et à partir d'où il absorbe – c'est l'absorption électronique d'un côté et de l'autre côté l'absorption multiphonons. » [p. 16]. « je me suis trouvé invité à faire des conférences plénières dans des congrès de télécoms alors que c'est tout juste si, un an avant, je connaissais le b.a.-ba de la propagation d'un signal dans une fibre, on appris tout ça, ce qu'était une fibre mono-mode, je ne savais pas. » [p. 6] « Les calculs théoriques (sur l'ultra transparence) nous disaient que pour que les verres soient intéressants, il fallait qu'ils ne contiennent aucun nanocristal. » [I Lucas, 2005, p. 16].

fluorures se confirme, Hagenmuller reconnaît finalement la force et la renommée de Lucas puis essaie de s'en attribuer les fruits : n'avait-il pas tactiquement laissé le jeune Lucas en avant-poste à Rennes chez son « ami » Prigent alors qu'il prenait la route du Sud-Ouest ? On a du mal à croire cette version a posteriori quand on sait à quel point son laboratoire a compté plus que tout. Il essaie de s'accommoder d'un laboratoire aussi petit en taille (dix fois plus petit que le sien). Lucas préfère éviter les conflits, assainir le climat et jouer en « électron libre » – expression qui détonne ici tant les forces du champ social sont fortes en chimie du solide –.¹⁹

Le Laboratoire de Rennes ne s'émancipe donc pas complètement et reste dépendant de la communauté nationale pour les postes de permanents (chercheurs et techniciens) et les promotions. En revanche, c'est bien le débarquement des multinationales en Bretagne qui a permis l'essor du laboratoire et le soutien venu de l'étranger qui a fait sa renommée internationale. Ce qui fait dire à Lucas que : « à Rennes, il y a eu les verres de fluorure indépendamment de la communauté » [I Lucas, 2005, p. 8]. La renommée pourtant, fût-elle internationale, ne fait pas vivre ! Pour le quotidien, on compte un peu sur l'université et beaucoup sur le CNRS. Pour le financement des thèses, la CGE (puis Alcatel) met la main à la poche mais c'est surtout un autre organisme d'État qui joue le principal rôle de sponsor : la Direction générale de l'armement (DGA). Les militaires sont intéressés par les propriétés extraordinaires des verres de fluorures (transparence dans l'infrarouge lointain), qui pourraient conduire à des applications pour la vision de nuit. Outre le financement de thèses, les crédits du ministère de la Défense permettent de s'équiper et d'acheter les instruments thermodynamiques et optiques nécessaires au basculement des savoir-faire.²⁰

Quittant (partiellement) la communauté française de chimie du solide, les Rennais se tournent vers un monde nouveau et participent à la construction d'un groupe scientifique. Il ne s'agit pas d'envisager l'industrie des télécommunications dans son ensemble mais de décrire la « communauté scientifique hybride ». Communauté parce qu'elle regroupe quelques centaines d'individus, scientifique parce que le point d'ancrage commun est la publication scientifique (orale ou écrite), hybride parce qu'elle se structure par la conjonction d'objets scientifiques (les verres de fluorures) et d'applications commerciales (fibres optiques), de la chimie du solide et des télécommunications, d'universités, de petites sociétés, de multinationales et d'organismes d'État. La mise en place de cette communauté fournit une

¹⁹ « Lucas n'était pas soutenu par Hagenmuller parce qu'à partir du moment où on n'était pas sous sa coupe, qu'on n'était pas d'accord avec lui, on était contre lui. C'est un esprit indépendant » [I Galy, 2006, p. 9]. « on s'est retrouvé quelquefois en conflit [avec Hagenmuller...] Nous avons eu des zones de recouvrement. » [p. 5] « *PT* : À ce moment-là, vous étiez plus reconnu au sein de la communauté française du solide ? – JL : Évidemment, ça n'a pas plu à Hagen. Il y a un moment où il a même fait courir le bruit que les verres fluorés, c'était à Bordeaux que ça avait commencé. Je me suis retrouvé en bisbille avec lui mais je m'y attendais. Pendant une dizaine d'années, j'étais sur sa liste noire, c'était malheureusement le moment où je sortais de l'ombre. [...] – *PT* : Votre laboratoire en a souffert ? – JL : Oui [...] Au contraire, il y en a un qui me soutenait à fond, c'était Robert Collongues – on était très copain avant mais là il a vu que ça dépassait les bornes. » [p. 6] « Il a bien fallu que Hagen reconnaisse, il a dit : "oui, tu es très connu", il s'est dit qu'il ne pouvait pas m'exclure parce que j'étais trop soutenu à l'extérieur. Très malin, il m'a accepté tel quel même si les niveaux d'échelle n'étaient pas les mêmes : dix types dans mon laboratoire contre cent cinquante chez lui. On a été assez malin l'un et l'autre pour éviter trop de clashes. » [p. 8] Hagenmuller « me laissait un peu d'air, de temps en temps, j'avais le droit d'avoir un poste CNRS et ça me suffisait largement d'avoir 4, 5 ou 6 types avec moi. » [I Lucas, 2005, p. 7].

²⁰ « Ces gens-là, venus de l'étranger, nous ont énormément aidés, c'était vraiment la communauté internationale des télécommunications par fibres qui a contribué à notre envolée. C'est ça ma carrière en fait. » [p. 6]. « la DGA – c'est eux qui avaient financé les verres de fluorure –. » [p. 9] « On s'est ré-équipé en optique et en calorimétrie puisqu'on avait de l'argent par la DGA. » [p. 16]. « Je n'ai pas à me plaindre : j'ai été financé pendant 25 ans par le CNRS, Alcatel et la DGA. Je n'ai pas eu de problème d'argent. » [I Lucas, 2005, p. 14].

illustration concrète du modèle de la « triple hélice » *University-Industry-Government*, développé par Etzkowitz et Leydersdoff [1998].

VII.2.2. Construire et articuler une communauté des verres non conventionnels

VII.2.2.1. Les verres de fluorure, une convergence de vues et d'intérêts (1974-1982)

La synthèse de fluorures de zirconium a ébranlé l'industrie des télécoms. Mais ce n'est que le début du chemin qui va du composé solide « en vrac » (« *bulk* » en anglais) aux matériaux pour une application précise. Et ce chemin est long de la chimie du solide vers une approche authentiquement matériau, qui conjugue divers paramètres, structure, propriétés, fonctions et procédés. Les chimistes sont désormais priés d'optimiser la composition chimique pour s'adapter au « cahier des charges » : pas de zones cristallisées, pas d'impuretés (chimiques) optiques, et des possibilités de mise en forme. Passer du solide brut – le lingot d'un kilogramme – à la fibre optique, tel est le nouveau défi des chimistes rennais. À l'originalité de synthèse il faut associer une connaissance supplémentaire : la « mise en forme », qui devient rapidement la nouvelle activité du Laboratoire, dès la fin des années 1970. Pour cela, on va utiliser la diminution drastique de viscosité au-delà de la T_g pour transformer les solides en « objets » ayant une forme donnée et un emploi. Ainsi, les thèses des années 1980 s'attachent simultanément à trois objectifs : synthèse originale, mise en forme et caractérisations physico-chimiques.²¹

La grande différence par rapport à 1972-1973 est que les Rennais ne sont plus seuls. À la suite du boom de 1974, d'autres laboratoires de recherche se sont lancés dans l'étude des verres de fluorures : universitaires, ingénieurs et chercheurs R&D, fonctionnaires des organismes d'État. Plusieurs dizaines de laboratoires prennent part à l'aventure à travers le monde. Chacun se mêle au groupe avec ses propres compétences et ses propres objectifs. Malgré – ou grâce – aux différences culturelles une dynamique coopérative se met en place : on va les uns chez les autres, on échange de manière informelle informations et tours de main, on se téléphone pour donner les dernières compositions testées, celles qui ont permis de réduire le pic de cristallisation... Même si la transparence n'est sans doute pas aussi totale (à cause d'une culture du secret en filigrane et des formidables enjeux financiers), chacun comprend l'intérêt qu'il y aurait à trouver une composition optimisée pour produire une fibre optique concurrentielle des fibres de silice. Malgré des intérêts divers, et parfois divergents, ces chercheurs venus d'horizons différents sont tournés vers le même objectif commun : trouver la composition chimique optimale. Certains le font pour la connaissance, d'autres

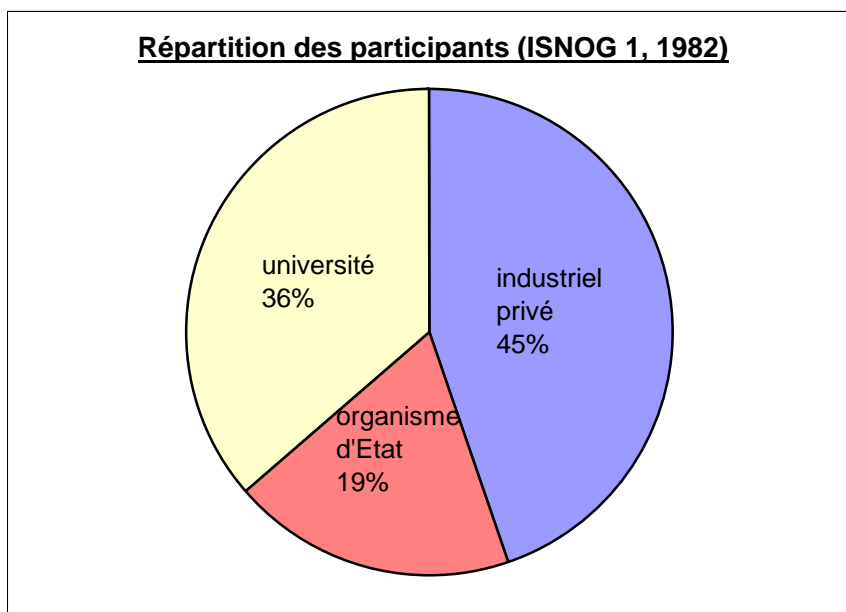
²¹ « Au-dessus de T_g , c'est le bonheur absolu : le matériau n'est plus un solide mais devient un solide plastique. Sa viscosité change – elle passe de 10^{12} , 10^{13} à 10^7 poises – et on peut commencer à faire des fibres. J'ai découvert tout à coup avec ces matériaux que j'allais vraiment pouvoir faire de vrais objets » [I Lucas, 2005, p. 15]. « La mise en forme des verres a été très vite identifiée comme incontournable pour aller vers les applications, dans le domaine des télécommunications notamment. Ainsi, la préparation de fibres optiques à partir des verres de fluorures a été abordée dès la fin des années 70 au laboratoire. » [p. 2]. « J'ai commencé au labo, en DEA, en 1980-81, ensuite j'ai présenté ma thèse de chimie en 1983 puisque à l'époque c'était en deux ans. – *PT* : *Quel était votre sujet de thèse ?* – *JA* : C'était sur les verres de fluorures. Comme aujourd'hui, l'activité du laboratoire était centrée sur la recherche de nouvelles compositions et sur la caractérisation physico-chimique : propriétés thermiques et propriétés optiques de l'ultraviolet à l'infrarouge. [...] On commençait aussi à s'intéresser à la mise en forme : durant ma thèse, j'ai travaillé sur le pressage à chaud, le moulage des verres de fluorures. » [I Adam, 2006, p. 1].

pour la renommée, plusieurs avec l'espoir de bénéfices financiers, de promotions sociales... Mais dans la mémoire des acteurs, ce qui domine c'est le plaisir d'être ensemble, de mener un projet commun et d'avancer de concert avec des collègues proches. Parce qu'à force de se rencontrer, d'aller les uns chez les autres, ils sont devenus amis.²² La photographie ci-dessous témoigne de l'esprit joyeux et fraternel qui a pu animer les pionniers des verres de fluorures : Lucas, Martin Drexhage (*Rome Air Development Center (RADC), US Air Force*), Cornillon Moynihan (*Rensselaer Polytechnic Institute*), Gunther Frischat (*university of Clausthal*), G.H. Sigel (*Naval Research Laboratory*)...

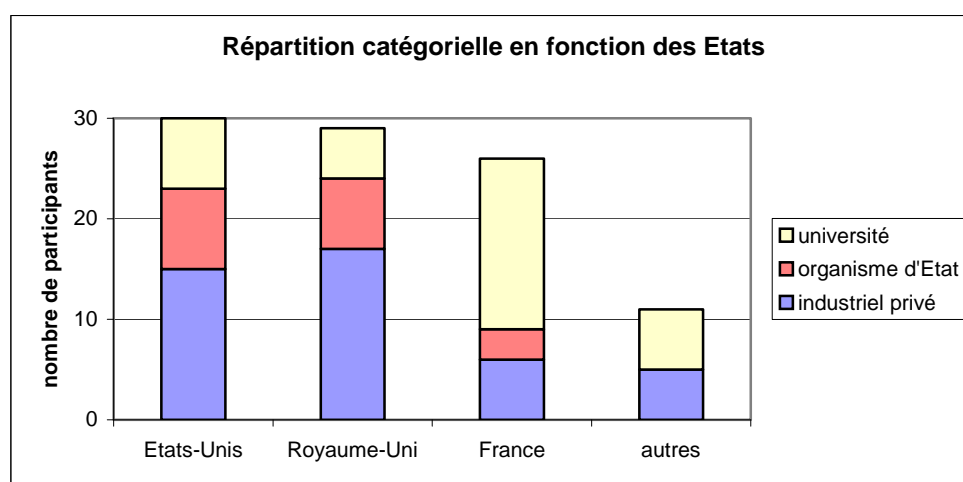


En avril 1982, la communauté organise un premier congrès international sous tutelle industrielle. Ce premier pas vers l'institutionnalisation de la communauté est confié aux Anglais qui organisent à Cambridge le « *First international symposium on halide and other nonoxide glasses* » [ISNOG, 1982]. Il est organisé par l'industrie du verre la *Society of Glass Technology* (une société privée visant au développement du verre). John Gannon de la *Standard Telecommunication Laboratories Ltd (STLL)* est l'organisateur en chef, secondé par Drexhage, Lucas, Moynihan, Poulain, Peter McMillan (Warwick university) et Sigel. Le congrès est co-financé par l'armée américaine (*US Navy*), ses antennes européennes (*Air Force European Office of Aerospace R&D, Army European Research Office*) et la STLL. Les participants, une centaine, sont répartis suivant les trois catégories déjà mentionnées (université, industriels privés, organismes d'État), dans les proportions suivantes : un gros tiers d'universitaires, un cinquième de fonctionnaires d'État et le reste d'industriels.

²² « on était à l'époque 15 ou 20 labos dans le monde à s'échanger des informations. J'avais des copains dans tous les coins du monde, c'était de vrais potes avec qui on faisait des javas. Il y avait les gens de Bell, de British Telecom, des Danois... On se téléphonait en se disant : "oui, j'ai mis un peu de sodium, j'ai gagné, le pic de cristallisation est plus petit..." On n'avait aucune notion à l'époque de protéger quoi que ce soit, on se disait surtout qu'il fallait mettre sur le marché un produit "fibrable". » [I Lucas, 2005, p. 16].



Une trentaine d'entreprises différentes sont présentes (environ un à deux collaborateurs par entreprise) ainsi que dix organismes d'État à vocation appliquée. Trois nationalités écrasent le congrès avec une trentaine de participants chacune : états-unienne (30 membres), britannique (29), française (26). Les participants restant (11) se répartissent selon huit nations avec trois représentants pour la RDA, deux pour le Japon et un pour chacun des autres : Belgique, Italie, Israël, Norvège, Portugal, Suisse. Au delà de ce premier constat global, on s'aperçoit que chaque pays (en particulier les trois gros) présente des différences significatives dans la répartition catégorielle comme l'illustre le diagramme suivant :



Les répartitions nationales montrent deux types de régime. Le premier, « anglo-saxon » (États-Unis et Royaume-Uni), présente une majorité d'industriels (au moins 50%) et un équilibre entre administrations à vocation appliquée (armement, télécommunications) et universitaires. Le second type correspond au cas français avec près de trois quarts d'universitaires (73%), une faible représentation des organismes à vocation appliquée (le CNET et la Directions des recherches, études et techniques (DRET), qui est un service de la

DGA) et plusieurs industriels de domaines différents (Saint-Gobain pour les verriers, Lafarge pour les réfractaires, Thomson CSF et CGE pour l'électronique et Corning Europe pour l'optique). Parmi les universitaires français, on retrouve la communauté de chimie du solide : Rennes en tête (Gilles Fonteneau, D. Louer, Lucas, M. Matecki, Marcel Poulain et son frère Michel) ; puis Bordeaux (Josik Portier, S. Stevic, B. Tanguy, J.-J. Videau) ; Le Mans (de Pape, C. Jacobini) ; Montpellier (B. Carette, Ribes) ; Paris (Flahaut). On trouve aussi deux verriers, l'un du Laboratoire des verres (E. Kony), l'autre, M. Prod'homme, en est issu mais a rejoint l'équipe de Bernard Blanzat à l'École centrale après le démantèlement du Laboratoire des terres rares (VI.3.1.2). Blanzat collabore aussi avec Drexhage. Par ailleurs, quelques chercheurs français ont décidé de se réunir régulièrement au sein d'un « club informel » de discussion sur les fibres optiques fluorées. Au départ, quatre laboratoires y participent, deux universitaires : Rennes et Le Mans, et deux industriels : Laboratoire de Marcoussis de la CGE (J.-P. Dumas et C. Le Sergent) et celui du CNET à Lannion (M. Monerie, H. Poignant) [NOGSn, 1988, n°13, p. 1-2].

En résumé, la répartition de congrès correspond à la juxtaposition de deux régimes nationaux : l'un anglo-saxon, l'autre français. Pour les autres pays présents, on note la présence d'industriels japonais (Nippon Sheet Glass Company, installée en Belgique et Furukawa Electric Company), allemand (Merck) et italien (CSELT).

De quoi traite-t-on à Cambridge ? Durant les quatre jours, une quarantaine de communications sont présentées, réparties en onze sessions.²³ Chaque session commence par une « conférence invitée » plus générale, de trente-cinq minutes (contre vingt minutes pour les autres). Sept sessions et 75% des communications portent sur les verres d'halogénures (« *halide* »). L'intérêt se focalise – comme le titre du congrès le suggère d'ailleurs – d'abord sur les verres d'halogénures, et ensuite, sur les autres verres non oxygénés comme les chalcogénures (« *chalcide* »). Ces derniers réunissent deux sessions (X et XI) dans lesquelles Flahaut²⁴ prononce une conférence invitée et Ribes présente le travail de son laboratoire. Les deux dernières sessions sont d'ordre plus général sur la formation des verres (VII, VIII).

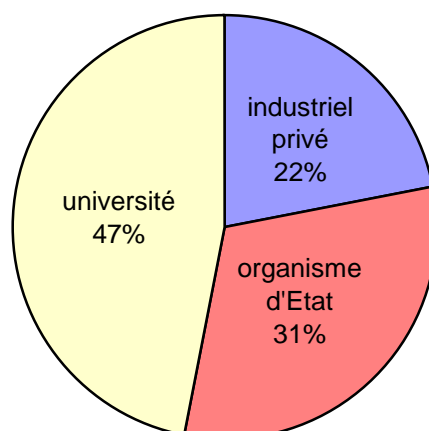
L'*abstract* des communications évoque des discussions à propos de synthèse, procédés (« *processing* »), caractérisations physiques et applications, moins de manière théorique (une seule session) qu'expérimentale. Deux Français sont présidents de session : Lucas sur la préparation et les procédés des verres d'halogénures et Poulain (Marcel) sur les verres d'halogénures de terres rares de sa thèse. Ces deux présidences, qui correspondent à 20% du total, confirment que le droit de préséance du laboratoire Lucas parmi les universitaires français. Un autre indice de reconnaissance est le nombre de communications des « Rennais » : sept (dont une conférence invitée), ce qui correspond à 17% du total (pour 6% des participants).

Il serait naïf de croire que les universitaires viennent là pour semer des idées que les industriels viendraient récolter pour les faire fructifier. Sont-ce les mêmes qui parlent et qui écoutent ? Une analyse des auteurs des communications indique la répartition suivante :

²³ Voici la liste des sessions (entre parenthèses le « *chairman* » de la session) : I et II « glass forming halide systems » (Gannon, Drexhage) ; III « halide glasses containing rare earths » (Poulain) ; IV « preparation and processing of halide glasses » (Lucas) ; V « optical properties of halides glasses » (Sigel) ; VI « optical and physical properties of halides glasses » (P.C. Schultz, Corning) ; VII « structure and glass formation : theoretical approaches » (Moynihan) ; VIII « structure and glass formation : experimental studies » (J.D. Mackenzie, University of California) ; IX « applications for halide glasses » (O.H. El-Bayoumi, Rome Air Development Center) ; X « chalcide glasses : preparation and properties » (J.A. Savage, Royal Signal and Radar Establishment) ; XI « chalcide glasses : properties and applications » (P.W. Mac Millan) [ISNOG, 1982].

²⁴ Le rapport d'activité du laboratoire Flahaut [RA LCM, 1976] indique qu'il étudie déjà des verres de chalcogénures en 1976.

Répartition des communications (ISNOG 1, 1982)



Effectivement, ce sont les industriels (privés) qui partagent le moins de résultats avec la communauté et en retirent le plus. Seulement douze des trente groupes industriels présents participent à au moins une communication. On peut quantifier cette tendance par un taux $\tau_{(\text{parole}/\text{écoute})}$ en faisant le quotient (pourcentage de communication) sur (pourcentage de participants). Même s'il faut prendre un tel calcul avec prudence – sous peine de réifier des catégories associant des entités différentes (Lafarge n'est pas Corning) –, il donne une idée pour la tendance globale. Égal à 0,48 pour les industriels privés, le taux $\tau_{(\text{parole}/\text{écoute})}$ croît jusqu'à 1,31 pour les universitaires et 1,63 pour les chercheurs des organismes d'État. Ce sont donc eux qui, proportionnellement, produisent le plus : six des dix administrations participent à au moins une communication, le *National Research Laboratory* étant de loin le plus productif. Ces nombres suggèrent une distribution marquée des rôles sociaux au sein du congrès : les payeurs, ceux qui financent spécifiquement des sujets pour récupérer des résultats (industriels privés) face aux producteurs, ceux qui reçoivent de l'argent pour en produire dans certains domaines (universitaires). Deux tiers des vingt et un laboratoires universitaires présents participent à au moins une communication. Le rôle des administrations publiques est double : d'une part elles mènent leurs propres recherches et divulguent des résultats ; d'autre part, elles sont sources de financement (comme l'*US Navy* pour le congrès ou la DGA à Rennes) et donc orientent la recherche des autres. Au total, une trentaine de laboratoires (publics, universitaires ou privés) ont participé à une communication au cours de ce congrès soit la moitié des soixante entités présentes.

Cette modeste analyse quantitative ne prend pas en compte les différences entre communications. Or, en détaillant session par session, on s'aperçoit que la répartition peut varier considérablement de l'une à l'autre (quasiment que des universitaires pour les sessions I et X, trois industriels et un organisme public pour la session V, etc.). Les questions posées et les composés étudiés dépendent donc eux aussi statistiquement de la catégorie : plutôt procédés et applications pour les industriels ; plutôt synthèse et structure pour les universitaires.²⁵ Les propriétés physiques sont, semble-t-il, le point de convergence qui

²⁵ Par exemple, la session IX orientée vers les applications ne propose aucune communication d'universitaire. En revanche la session VIII sur les études expérimentales structurales et de formation des verres est quasi-exclusivement occupée par des universitaires (l'une des communications est issue d'une collaboration entre le Laboratoire JJ Thomson et l'*Atomic Energy Research Establishment*).

intéresse toutes les catégories de participants. Pour neuf sessions, on ne trouve que deux des trois catégories présentes à la tribune : dans seulement un cas, c'est l'organisme public qui est absent alors que les deux autres le sont quatre fois chacun. Cet indice suggère encore le rôle intermédiaire joué par les organismes publics entre les industriels privés et les universitaires. Médiateurs, les organismes d'État s'intéressent à tout l'éventail de la synthèse chimique aux applications. Bien sûr, ce ne sont que des tendances.²⁶

Le boom de 1974 portait l'espoir de fabriquer des « fibres optiques » meilleures que celles de silice. Après de multiples efforts et de nombreux échecs, la communauté s'est finalement fixée autour d'une composition subtile contenant pas moins de cinq éléments métalliques différents associés au fluor : Zr-Ba-La-Al-Na. Le verre « ZBLAN » (acronyme pour les cinq constituants) devient le « verre technique que tout le monde utilise dans le monde pour faire des fibres » [I Lucas, 2005, p. 13]. Résultat d'un formidable effort collectif associant environ trente laboratoires (producteurs) à travers le monde : mélange de travaux acharnés à la paillasse, de financements orientés et de partage d'informations sans arrière pensée. Au sein de la communauté, certains veulent aller plus loin en valorisant eux-mêmes leur recherche. Comme la plupart de leurs collègues français (VI.3.2.3), les Rennais ont déposé des brevets, sûrement plus que les autres solidistes d'ailleurs. Ils se montrent plus entrepreneurs en utilisant le savoir technologique pour monter une « *start-up* ». Pari audacieux de lancer une entreprise viable : à la fin des années 1970, sous l'impulsion de Lucas, la société « Le Verre fluoré » est créée par des anciens étudiants du Laboratoire, à Saint-Erblon, près de Rennes. Le « transfert technologique » réussit, la société fonctionne, des fibres optiques fluorées sont fabriquées puis vendues. G. Maze et V. Cardin viennent d'ailleurs au congrès de Cambridge pour partager une partie de leur expérience.²⁷ Encore aujourd'hui, Le Verre fluoré est l'une des rares sociétés à pouvoir le faire. Lucas s'en désintéresse finalement assez rapidement après le lancement, préférant la « science » au « *business* ».²⁸

Ainsi ce que l'on désigne toujours par le même nom, la science, ne cesse de se modifier au cours du temps. De même qu'il est devenu indispensable à la société Le Verre fluoré de savoir "fibrer" le verre, il peut devenir fort utile, même pour un « fondamentaliste », de maîtriser la « mise en forme ».²⁹ Pour rester performant dans la communauté des verres d'halogénures, le solidiste « fondamentaliste » doit s'adapter à l'orientation vers les applications : du solide « en vrac », qui suffisait à la chimie du solide conventionnelle, il passe

²⁶ Par exemple, un chercheur de *General Dynamics* peut avoir une contribution très fondamentale sur la transmission IR et les propriétés micro-structurales d'un verre de sulfure-arsenic (session XI).

²⁷ Leur communication (session IX), *Fluoride glass optical fibres*, « presents the results of systematic attempts to draw fluoride glass fibres from both rods and preforms. Three fluoride compositions were investigated: 57% ZrF₄, 34% BaF₂, 5% LaF₃, 4% AlF₃ [etc.] ». [ISNOG, 1982].

²⁸ « Une entreprise *Le Verre Fluoré* a même vu le jour à cette époque et reste encore aujourd'hui un des rares fournisseurs de fibres optiques fluorées dans le monde. » [I Adam, 2006, p. 2]. « JL : J'ai eu la chance [...] de faire ce qu'on appelle un transfert de technologie. Les verres de fluorure sont devenus la société de *Verre fluoré*. Ça ne m'a pas intéressé très longtemps parce que ce genre de *business*, ce n'est plus de la science. » [I Lucas, 2005, p. 9].

²⁹ La mise en forme n'est pas pour autant devenue indispensable à la communauté de chimie des solides. Certains se sont spécialisés dans ce domaine comme le CIRIMAT à Toulouse (VI.3.2) mais d'autres comme l'IMN à Nantes préfèrent déléguer : « Nous sommes plutôt dans une situation amont, c'est-à-dire que si nous devons nous intéresser aux applications, nous développons des collaborations avec les polyméristes ou les électrochimistes. La synthèse et la caractérisation sont nos points forts, nous sommes bien placés en électrochimie mais la mise en forme est souvent déléguée. Nous avons des collaborations avec des laboratoires universitaires qui ne font pas la même chose que nous mais aussi avec des industriels comme Marcoussis (ex-CGE). » [I Tournoux, 2006, p. 15-16].

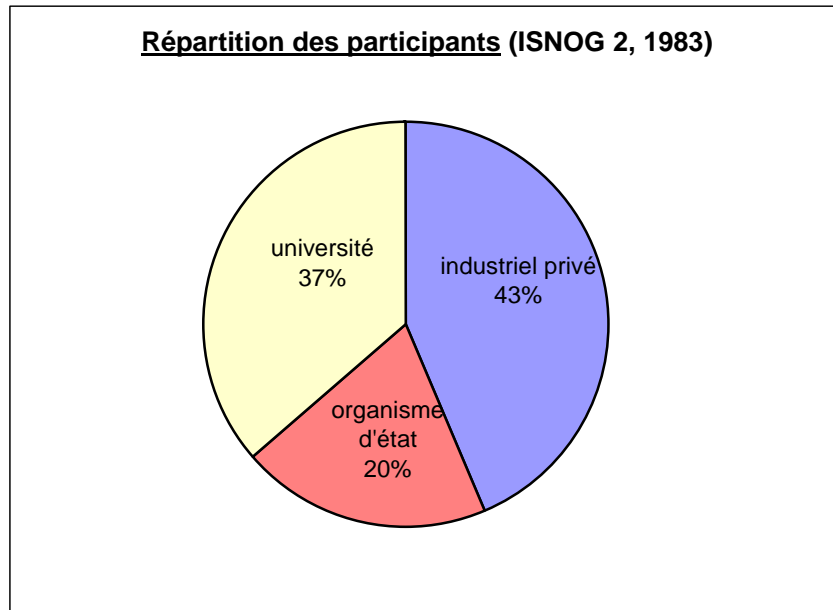
au « matériau » mis en forme. Au contact des industriels, les Rennais diversifient leur activité vers la mise en forme, le moulage, l'extrusion (écoulement du verre fondu dans une tuyère)... Au congrès de 1982, Lucas préside d'ailleurs la session dédiée aux procédés. Certaines caractérisations mécaniques sont désormais nécessaires pour remplir le « cahier des charges » : calorimétrie, optique, travail du verre, mécanique.³⁰

En une décennie à peine (1972-1982), le Laboratoire de chimie minérale B de Rennes est passé d'une culture cristallochimique, caractéristique de la chimie du solide française des années 1960-1970, à une « ingénierie matériau » [I Lucas, 2005, p. 14]. Si Lucas veut y voir l'influence de Collongues, qui définissait le matériau comme un solide utile, il me semble que les circonstances locales de Rennes sont plus déterminantes. En effet au LCAES, héritier de Collongues, le programme de recherche « laser » des années 1980 (IV.3.3) encouragé par l'industrie n'a pas vraiment développé un « *engineering* des oxydes métalliques » [I Lucas, 2005, p. 1]. La mise en forme par exemple reste absente. Au contraire le laboratoire de Rennes s'émancipe de sa communauté d'origine, en adaptant son programme de recherche au nouvel environnement. Le Laboratoire induit un double mouvement. En adoptant les « procédés » de mise en forme, il enrichit la « matrice disciplinaire » de la chimie du solide (III.2.2) et participe de son renouvellement en chimie des solides (chapitre VI). Réciproquement, en participant à la construction d'une nouvelle communauté métisse de multiples cultures, il la reconfigure en partie et l'enrichit de son propre savoir-faire (en synthèse originale notamment). Ainsi le laboratoire traverse les frontières sociales et épistémologiques : poste frontière ouvert, il constitue un lieu de passage entre deux mondes – nocher de la connaissance – ; migrateur impénitent, il devient un atelier de création qui puise son inspiration à de multiples sources culturelles – producteur d'un savoir-faire hybride –.

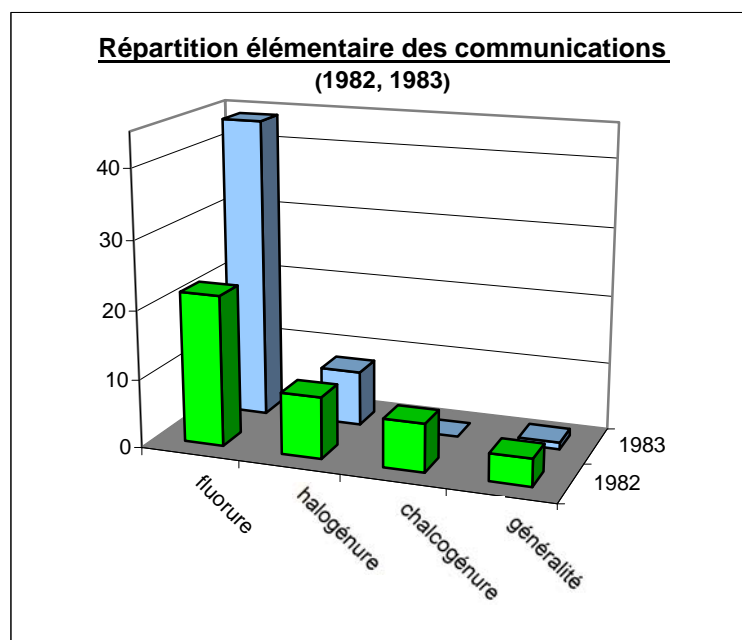
VII.2.2.2. Des lendemains qui déchantent (1982-2000)

De 1974 à 1982, on passe d'un pic d'agitation médiatique à la mise en place d'une communauté « hybride » structurée par un premier congrès international. Au printemps 1982, à Cambridge, des groupes de cultures variées se sont rencontrés pour discuter de problèmes communs. Le premier congrès se clôt sur un bilan positif et on décide d'en organiser un second, un an et demi plus tard, en août 1983, à Troy (USA), au *Rensselaer Polytechnic Institute*, chez Moynihan. Le « *Second International symposium on halide glasses* » suggère, par son titre, un recentrage sur les seuls verres d'halogénures [ISNOG, 1983]. Un seul changement dans le comité d'organisation : un Américain, Osama El-Bayoumi (RADC), remplace un Anglais, MacMillan, spécialiste des chalcogénures. D'ailleurs, en raison de l'éloignement, peu d'Européens font le déplacement et le congrès est numériquement écrasé par les États-Uniens (85% des participants). Une étude statistique de l'assistance fournit pourtant une représentation catégorielle comparable à celle de 1982 (VII.2.2.1), comme le montre le schéma ci-dessous :

³⁰ « Avec ça [calorimétrie, optique] et les machines de polissage, découpage, on fait 80% du cahier des charges. Ensuite on a fait un peu de mécanique parce que les gens voulaient savoir quand est-ce que ça cassait. » [I Lucas, 2005, p. 16].



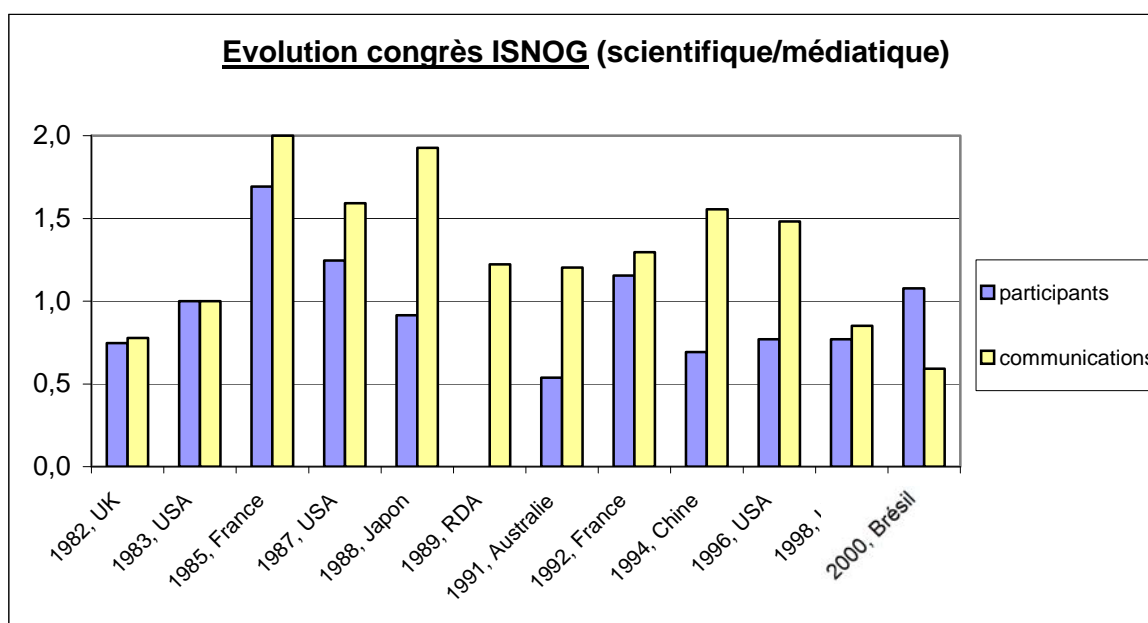
Au début des années quatre-vingt, la communauté des verres d'halogénure présente donc bien une structure ternaire associant universitaires (deux cinquièmes), organismes d'État (un cinquième) et industriels privés (deux cinquièmes). Ce sont à nouveau des verriers qui parrainent l'événement : la « *Glass Division* » de l'*American Chemical Society* (ACS). Moynihan était d'ailleurs un « spécialiste du verre, en particulier des propriétés structurales et thermodynamiques » [I Adam, 2006, p. 7] avant de s'intéresser momentanément aux verres de fluorures. En termes de publications, une analyse « élémentaire » des titres des communications orales fournit la répartition suivante pour les deux premiers congrès.³¹



³¹ L'analyse étude est basée sur les indications contenues dans les titres des communications orales [ISNOG, 1982 ; 1983], qui sont suffisantes pour établir quatre catégories : 1) fluorure (seul) ; 2) halogénure ; 3) chalcogénure ; 4) généralité (verre, non oxyde). La catégorie « halogénure » comptabilise les chlorures, les iodures, les bromures et les halogénures (qui contiennent de fait les fluorures) mais pas les fluorures seuls.

L'étude comparative montre que le comité d'organisation a décidé de recentrer les congrès autour des seuls halogénures. Les fluorures écrasent le deuxième congrès puisque 83% des communications leur sont consacrées (contre 52% au premier congrès). Au début des années 1980, ce sont bien les verres de fluorure qui occupent le devant de la scène (au sein de la communauté). Après ce congrès, les pionniers mettent en place le cycle périodique des « *International symposium on halide glasses* », tous les dix-huit mois environ. Sponsors privés et publics continuent d'en financer l'organisation.

Le troisième congrès se tient à Rennes en juin 1985 avec de nombreux soutiens financiers.³² Le schéma ci-dessous rend compte de l'évolution du nombre (approximatif) de participants mis en regard avec le nombre de publications présentées. Le deuxième congrès est pris comme référence parce que c'est le premier exclusivement dédié aux halogénures (sans chalcogénures). Un tel schéma donne des indications sur la signification d'un congrès : le nombre de participants correspond à un sondage « médiatique » tandis que le nombre de communications correspond à un sondage « scientifique ». Le quotient (nombre de communications) sur (nombre de participants), $\tau_{(\text{scientifique}/\text{médiateur})}$, est pris égal à un pour le congrès de référence 1983.



Notons d'abord que la répartition géographique des congrès complique la donne : on est prêt à parcourir plus de chemin si l'on est auteur que si l'on est spectateur à cause de l'argent et du temps que l'on est prêt à investir. Comme l'Europe et les États-Unis sont les principaux foyers de la communauté, toute organisation qui s'en éloigne (Japon, Australie, Chine, Brésil) a tendance à accroître le $\tau_{(\text{scientifique}/\text{médiateur})}$. Ayant posé ceci comme présupposé, on peut tenter une analyse par périodes successives pour l'évolution de la communauté des verres d'halogénures.

Au moment de l'émergence de la communauté, entre 1973 et 1981, on peut penser que peu de communications scientifiques sont produites parce que les équipes commencent à peine à travailler sur les verres de fluorures et rares sont celles qui, comme Rennes, peuvent déjà publier. En revanche l'intérêt médiatique est gigantesque, ce qui correspond à l'afflux

³² Les soutiens sont soit publics : CNRS, ministère de la Recherche, DRET, CNET, Saint-Gobain (nationalisé), collectivités locales (université, municipalité, chambre de commerce), USAF, US Army ; soit privés : Corning Europe, CGE, Corning, GTE Labs, Spectran Corporation ; français et étrangers [ISNOG, 1985].

massif d'industriels télécoms en Bretagne. Lorsque les groupes producteurs commencent à échanger et que les payeurs viennent leur proposer des contrats, une communauté scientifique se construit sur financement appliqué, public ou privé, ce qui correspond à une période autour de 1980. La production scientifique rattrape alors l'intérêt médiatique. Une communauté s'est stabilisée autour d'une taille fixe (quelques centaines de personnes), qui détermine le nombre de participants aux congrès (une centaine de personnes). Dans le même temps, la production scientifique, quant à elle, connaît une croissance rapide. Le rapport scientifique/médiatique augmente fortement dépassant largement le rapport des premiers congrès (taux égal à un pour le deuxième congrès) : $\tau_{\text{(scientifique/médiatique)}}$ égal à 1,2 (Rennes), 1,3 (Monterey, Californie), 2,1 (Fuji Institute, Japon), 2,2 (Victoria, Australie). C'est l'« âge d'or » des verres de fluorures, qui correspond à la maturité de la communauté (1987-1991). Après ce maximum, on s'attend à une décroissance du rapport scientifique/médiatique. En 1992, le congrès de Perros-Guirec, organisé au CNET, marque une brutale diminution à un taux égal à 1,1 (plus bas que Rennes). Les deux congrès suivants montrent une remontée spectaculaire du taux : 2,3 (Hangzhou, Chine), 1,9 (Corning, USA), qui correspond à deux évolutions marquantes : une augmentation de la production scientifique et une baisse de l'intérêt médiatique (en 1994, 60% de l'assistance de 1992).

Comment rendre compte de ces deux évolutions ? Par ordre d'importance, je propose quatre niveaux de réponse liés les uns aux autres. Premièrement on peut dire que mathématiquement le congrès de Perros-Guirec est comparable à celui de Rennes, sept ans plus tôt, ce qui simplifie le problème mais ne prend pas en compte la dynamique communautaire (émergence, consolidation, pic, décroissance). La deuxième proposition est géographique : les congrès en Chine et aux USA, étant loin de l'Europe (principale source de participants) exacerbent le taux en favorisant la migration des auteurs mais pas celle des spectateurs. Le congrès suivant (Sheffield, 1998) redonne un taux égal à 1,1 proche de celui de Cambridge seize ans plus tôt (1). Le troisième argument propose la prise en compte de l'histoire communautaire. On a vu que c'est à Perros-Guirec que le reflux semble s'amorcer mais ne se confirme pas pour les deux suivants. Or, à partir du congrès chinois de 1994, le congrès change de nom pour s'intituler désormais *International Symposium on Non-Oxide Glasses* (ISNOG). C'est-à-dire que la communauté a modifié ses priorités, non plus seulement halogénures (en particulier les fluorures), mais tous les verres non conventionnels (sans oxydes). Les chalcogénures en particulier prennent de plus en plus d'importance.³³ Cette interprétation rend compte de l'augmentation de la production mais rend plus aberrante encore la diminution drastique d'affluence au congrès. Pourquoi l'auditoire diminue-t-il alors que plus de composés chimiques sont abordés ? Si l'on se rappelle de la répartition du congrès de 1982 (VII.2.2.1), l'assistance est composée à plus de 45% d'industriels, qui influent peu sur la quantité de communications. C'est donc du côté économique qu'il faut chercher un quatrième niveau de réponse. D'ordre géopolitique, il dépasse largement les ressorts de la communauté des verres. Les années quatre-vingt ont été marquées par une « financiarisation de l'économie » [Pestre, 2003, p. 83-84] en provenance des États-Unis. Le tournant de 1990 amplifie le phénomène puisqu'il marque le démembrament du bloc soviétique et la fin de la guerre froide. La défaite du capitalisme d'État donne, par contrecoup, des ailes au capitalisme privé : l'innovation scientifique qui avait été, aux États-Unis surtout, l'une des priorités stratégiques de la guerre froide devient subitement moins cruciale comparés aux profits financiers. L'onde de choc n'épargne pas les scientifiques. Les laboratoires de recherche (avec des scientifiques de très haut niveau) de multinationales comme Bell Telephone, Dupont de Nemours ou NTT qui avaient fait leur force en innovation, sont sacrifiés sur l'autel

³³ La répartition des communications orales change sensiblement à partir du congrès chinois : Australie, 1991 (89% des communications portent sur les halogénures / 7% sur les chalcogénures) ; France (88% / 12%) ; Chine (71% / 19%) ; USA (69% / 25%).

des dividendes. L'effort de recherche est suspendu.³⁴ La France n'est pas non plus épargnée : le CNET est dissous ainsi qu'Alcatel Recherche. Pour les universitaires, la situation est moins dramatique parce qu'ils conservent leur poste malgré la crise et continuent de percevoir l'argent des programmes prévus avant 1990.³⁵ Une telle crise au sein des multinationales – en particulier celle des télécoms – avec une diminution drastique des effectifs et des dépenses de recherche induit fort probablement une désaffection des industriels aux congrès scientifiques internationaux – en particulier les congrès ISNOG –. En revanche la production scientifique, basée sur un travail à long terme et majoritairement assurée par des fonctionnaires (universitaires et organismes gouvernementaux), ne diminue pas et augmente même du fait de l'élargissement aux chalcogénures.

Au cours des années 1990, les congrès ISNOG, d'une part, deviennent moins intéressants pour les industriels, d'autre part, se réorientent vers les chalcogénures. Un tel virage déplace progressivement le centre de gravité de la communauté et la restructure en profondeur : des gens la quittent (Moynihan, Drexhage, Gannon) ; d'autres y entrent (en lien avec les chalcogénures) et certains réorientent leurs recherches passant des halogénures aux chalcogénures (NRL à New York).³⁶ En 1998, au congrès de Sheffield, Lucas, Poulain et Sigel sont les trois derniers pionniers à faire encore partie du comité d'organisation. La restructuration progressive de la communauté a pour conséquence de stimuler la production scientifique sans parvenir à relancer l'intérêt médiatique. Le sursis est de courte durée puisque les deux derniers congrès du siècle présentent un $\tau_{(\text{scientifique}/\text{médiatique})}$ proche de un (Sheffield) puis largement inférieur à un (Brésil), ce qui est la première fois depuis le début des congrès, vingt ans plus tôt. Le choix du Brésil – éloigné de l'Europe et des États-Unis – était pourtant plus favorable à une migration des auteurs que des participants et aurait dû favoriser une augmentation du taux $\tau_{(\text{scientifique}/\text{médiatique})}$. Le communauté des verres conventionnels s'essouffle donc vers la fin des années 1990.

³⁴ « Vers 1990, il y a un grand tournant dans les grosses sociétés américaines. Jusque-là, elles faisaient la course aux recherches et rêvaient de prix Nobel : aux *Bell Labs*, il y a eu jusqu'à 6 prix Nobel dont certains en chimie du solide, sur les transistors, les lasers... Ils étaient très proches de ce que l'on faisait. Quand j'étais invité aux *Bell Labs*, je préparais mes *talk* parce qu'il y avait là des gars qu'on admirait. À partir de là, chez Du Pont ou chez Bell, ça a commencé à sentir le roussi : les prix Nobel ne comptaient plus, les publications non plus, on préférait acheter des licences. [...] Ça s'est dégradé, les budgets n'ont pas suivi, *Bell Labs* a été coupé et saucissonné en morceaux, Du Pont a quasiment arrêté la chimie du solide parce que ça ne rapportait plus rien. Chez Du Pont, j'étais alors consultant avec deux autres : un gars du MIT et Chu, qui était inventeur dans les supra *high T_C*, ils nous ont jetés et on a senti que c'était fini avec l'industrie. Les actionnaires des fonds de pension et d'investissement arrivaient aux commandes de ces sociétés et les scientifiques de haut niveau en sont partis. » [I Lucas, 2005, p. 14-15].

³⁵ « On a vu le CNET dissous, Alcatel Recherche dissoute, nous avons récupéré l'argent qu'ils avaient investi mais ça fait mal au cœur quand on voit que dans ces boîtes-là – que ce soit en France ou États-Unis – [...] Quand on a vu que ça coulait, qu'Alcatel fermait le labo des fluorures, le labo des fibres, le labo des amplificateurs optiques [...] je me suis dit quel gâchis d'intelligence. On nous a dit : ailleurs c'est pareil ! Et c'était vrai : mes amis de NTT étaient dans la même situation. [...] C'est extrêmement tendu en ce moment alors qu'on nous disait que ça n'allait durer que 2 ou 3 ans, que c'était la "morne plaine", qu'il y aurait une nouvelle clientèle pour les produits télécom, ce qui n'est pas vrai. C'est plutôt *hard* en ce moment ! » [I Lucas, 2005, p. 15]

³⁶ « *PT* : C'est une histoire qui a aussi démarré à Rennes ? – *JA* : Les verres de chalcogénures représentaient une famille de matériaux déjà connue. [...] *PT* : Est-ce que la communauté ISNOG est passée des verres de fluorure à ceux de chalcogénure ou bien elle a éclaté ? – *JA* : Il y a eu une transition, oui : un certain nombre de laboratoires – dont le NRL aux États-Unis [*National Research Laboratory*] – sont passés des verres de fluorures aux chalcogénures. D'autres laboratoires, dont les verres de chalcogénures étaient déjà la spécialité, nous ont rejoints dans les congrès ISNOG. » [p. 3]. « Les Anglais organisateurs du premier congrès [Gannon, STL, 1982] ont effectivement arrêté cette activité. Mais d'autres laboratoires anglais ont repris le flambeau (Univ. Leeds, Sheffield, Southampton). [...] Je dirais qu'on est un peu les derniers à avoir gardé une activité continue et forte dans les verres non conventionnels depuis une trentaine d'années, avec sans doute aussi le NRL. » [p. 7] « [I Adam, 2006, p. 7].

Pourquoi ? Les acteurs eux-mêmes suggèrent trois réponses. Tout d'abord, à cause d'une synthèse épuisée : lorsque une multitude de nouvelles compositions de verres de fluorures – qui sont restés incontestablement les halogénures les plus intéressants – a été testée, il est plus difficile d'être original et le filon des combinaisons élémentaires se réduit. Ensuite, comme souvent, le matériau final n'a pas tenu les promesses que suggérait le solide initial. Des fibres de verre fluoré ont été commercialisées mais uniquement pour des applications à "courte distance". Marché non négligeable certes mais localisé, de très haute technologie : « lasers à fibres », « amplificateurs optiques », lentilles de très haute précision, des « verres *guidantes* planaires »... Des fibres fabriquées par Le Verre fluoré sont actuellement utilisés dans les interféromètres du *European Southern Observatory* (La Silla) au Chili.

On est loin en termes de débouchés du remplacement des fibres optiques en silice à grande distance : câbles intercontinentaux et câbles quotidiens de tous les réseaux de par le monde. En effet, si intrinsèquement la fibre de fluorures est supérieure à la silice (moins d'atténuation), atteindre le degré de pureté requis n'a pas été possible durant les années 1980 puis 1990 malgré tous les efforts déployés. Or, quelques parties par millions de défauts optiques suffisent à rendre la fibre fluorée moins performante que la silice. Ainsi les contrats peu à peu se tarissent, la communauté et les financiers ne croient plus à la toute puissance des fluorures. Enfin, troisième niveau, qui une nouvelle fois dépasse largement la communauté ISNOG : « l'éclatement de la bulle des télécoms » en mars 2000. Bulle spéculative, lubie de décideurs, gigantesque erreur de « spécialistes », prévisions auto-entretenues, peur de rater le train de la modernité, spectre millénariste... ? Quoiqu'il en soit il devient évident que les besoins (en débits) ont été surévalués et que le système peut encore très bien fonctionner pour plusieurs années avec ses bonnes vieilles fibres de silice. Les verres fluorés sont moins financés. À Rennes, le dernier contrat sur les fluorures est signé en 2000, les dernières recherches s'achèvent en 2004.³⁷

VII.2.2.3. *Non Oxide Glass Society* : une initiative originale et des enjeux communautaires (1986-1998)

Le mouvement de désaffection ne saurait cependant être décrit en termes d'abandon ou de renoncement à un grand espoir. À partir de 1986, la communauté des halogénures s'est

³⁷ « La porte a été ouverte en 1974 et on a eu une très forte activité jusqu'en 1995. La découverte de nouvelles compositions s'est un peu tarie ensuite. [...] Intrinsèquement, le verre de fluorure est plus performant que la silice pour la transmission des signaux *télécoms*, avec une atténuation optique inférieure de 1 à 2 ordres de grandeur. Mais encore faut-il pouvoir l'obtenir dans un état de pureté parfaite qu'aucun laboratoire dans le monde n'a réussi à atteindre. L'utilisation des fibres de fluorures reste limitée aux applications "courtes distances", pour les lasers à fibres ou les amplificateurs optiques par exemple. Les derniers contrats de recherche que nous avons obtenus sur les verres de fluorure pour les amplificateurs optiques datent de l'année 2000. Ensuite, cette activité a fortement chuté avec l'éclatement de la bulle des *télécoms*, c'est très net. » [p. 2] « Il n'y avait plus d'espoir et donc plus de financement. Cela a été un problème global, pas seulement celui des verres de fluorure, dû à une sur-évaluation des besoins en télécommunication par fibres optiques. [...] En 2000-2001, la réalité est apparue : les réseaux en place étaient largement suffisants en terme de débits, pour répondre aux besoins actuels et pour de nombreuses années à venir. En gros, les acteurs majeurs du domaine s'étaient "plantés" d'un facteur 10 dans leurs prévisions. On ne sait pas d'ailleurs s'il s'agissait d'une erreur ou de spéculation ! On a vu tout de suite le contre-coup : Alcatel a arrêté ce type d'étude assez amont, France Telecom [CNET] avait de toute façon beaucoup diminué ses recherches sur les verres de fluorure dès 1992-93. Nous n'avions plus de partenaires – c'était un constat mondial – les activités sur les verres de fluorure ont commencé fortement à décliner à partir des années 2000-2001. Nous avons malgré tout maintenu une activité sur le sujet jusque 2004 pour réaliser des structures *guidantes* planaires, de verres de fluorure, pour la distribution et l'amplification des signaux. » [I Adam, 2006, p. 3].

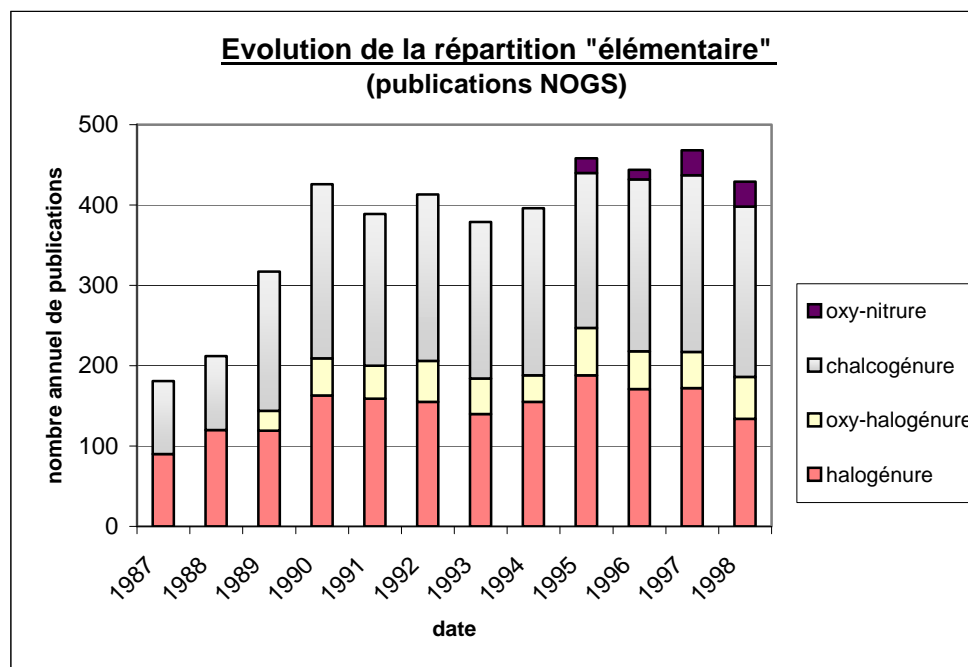
déjà ouverte aux verres de chalcogénures. En effet, sous l'impulsion du Laboratoire Lucas est lancée une société internationale anglophone : *Non Oxide Glass Society* (NOGS) dont le siège est situé sur le campus de Beaulieu (université Rennes 1). Les chimistes rennais ont eux-mêmes commencé à développer une activité chalcogénure depuis 1984 (VII.3.1). Vu les évolutions technologiques – la difficulté pour mettre en œuvre les fibres de fluorures – ce ne sont probablement pas les seuls à opérer une telle réorientation dès cette époque-là. L'originalité de la société NOGS réside dans ses motivations et sa mise en œuvre. NOGS n'a pas vocation à faire concurrence aux autres sociétés scientifiques – sa structure bureaucratique est minimale (une seule salariée, Christine Adam) –, ni à organiser des congrès – les ISNOG marchent très bien tout seuls –. La société sert uniquement de relais informatif (« *clearing-house* ») en publiant une feuille de chou bimestrielle (de huit à douze pages) : les *NOGS news* (NOGSn). L'idée est de partager des informations : le compte rendu ou l'annonce d'un congrès, l'état des lieux de la recherche dans tel pays, de tel organisme (privé, public, laboratoire)... Peuvent y entrer tous ceux qui s'intéressent à la "physique, chimie, science des matériaux et les applications des verres d'halogénures et de chalcogénures". L'objectif est donc clair : favoriser les échanges autour des « verres non conventionnels ». Ce qui surprend aussi c'est la façon dont le « *board of editors* » (Lucas, Drexhage, Seiko Mitachi, Paul France, Frischat, Jean-Luc Adam, Fonteneau) demande la contribution des lecteurs. Les *NOGS news* doivent simultanément "attirer" et "informer" : d'un côté la ligne éditoriale dispose d'informations qu'elle met en commun mais en retour les lecteurs peuvent aussi compléter, rajouter, discuter. Chaque information peut provenir de tous les sociétaires et chaque sociétaire a accès à toutes les informations.³⁸ Une telle initiative figure sur le papier le système d'interactions d'un groupe d'individus et d'institutions qui échangent des informations sur un champ scientifique spécifique, c'est-à-dire une communauté scientifique. La NOGS permet donc d'analyser sur le papier les caractéristiques de la « communauté NOGS », différente de la communauté ISNOG (VII.2.2.2) ou de la communauté (hypothétique) des verres non conventionnels. Par exemple, ce n'est qu'en 1994 qu'ISNOG accueille les chalcogénures alors que NOGS est ouverte à tous les verres non conventionnels dès son lancement, en 1986. Malgré leurs différences, les trois ensembles (NOGS, ISNOG, verres non conventionnels) ont de multiples points de convergence. De nombreux laboratoires sont investis dans les trois communautés : le Laboratoire de chimie minérale D, celui des Fluorures, ainsi que tous les laboratoires qui gravitent autour du *board* : CNET, NRL, British Telecom (P. France), NTT (S. Mitachi)...

Les *NOGS news* regorgent d'informations ponctuelles sur la communauté, en particulier de nombreuses descriptions détaillées de situations locales (écrites en interne par le personnage le plus en vue). J'ai surtout retenu deux types d'informations dont j'ai fait un inventaire systématique : les publications et les brevets. Chaque bimestre, le bulletin répertorie les nouvelles publications et les nouveaux brevets sortis depuis le dernier numéro. La recherche des publications est faite grâce à la revue bibliographique *Current contents* (VI.2.2.1). Comme, de surcroît, le journal fonctionne avec un retour critique des lecteurs, on peut penser que théoriquement la liste des publications représente au moins le travail de ceux

³⁸ « *Welcome to NOGS! This introductory issue of our bulletin is intended to both entice and inform. "Entice" because we want you as a participant of this new venture. "Inform" because it is the free flow of scientific information which has allowed non-oxide glass science and technology to grow so rapidly. [...] NOGS is not intended to compete with other scientific societies; it will not directly sponsor technical meetings, have an annual convention, or publish a technical journal. It will act as a clearinghouse and source of information for those involved in a rapidly advancing sub-specialty of glass science and solid-state chemistry. We welcome all those who have an interest in the physics, chemistry, materials science and applications of halide and chalcogenide glasses. [NOGSn, 1986, n°1, p. 1].* »

qui lisent les *NOGS news*, c'est-à-dire de ce que j'ai appelé la communauté NOGS. Pour les brevets, c'est moins sûr dans la mesure où on fait moins leur publicité parmi les industriels.

Grâce à cette étude systématique, on peut suivre l'évolution annuelle des thèmes « élémentaires » publiés au sein de la communauté NOGS de 1987 à 1998. Commençons par les publications.



Première remarque : le nombre de publications répertoriées augmente régulièrement et grosso modo, il double en dix ans. À productivité à peu près constante, la taille de la communauté NOGS doit donc elle aussi doubler. Cette information est intéressante dans la mesure où elle contredit des impressions locales : si on suit la trajectoire d'un laboratoire précurseur comme celui de Rennes, il semble que le domaine s'essouffle plutôt au cours de la décennie. Deuxième remarque : si le rapport halogénure/chalcogénure est proche de un à la fin des années 1980, il évolue sensiblement pour finalement pencher en faveur des chalcogénures. Sur la décennie (1989-1998), la moyenne annuelle des chalcogénures avoisine les deux cents publications tandis que celle des halogénures atteint juste cent soixante. Les halogénures n'ont pas pour autant cessé d'être étudiés (encore une fois, ce n'est pas l'impression que donne Rennes). Troisième remarque : la communauté NOGS inclut aussi l'étude d'autres verres : les oxy-halogénures à partir de 1989 (44 par an sur la décennie soit quasiment le quart des halogénures) et les oxy-nitrures après 1995 (23 par an sur les quatre dernières années).

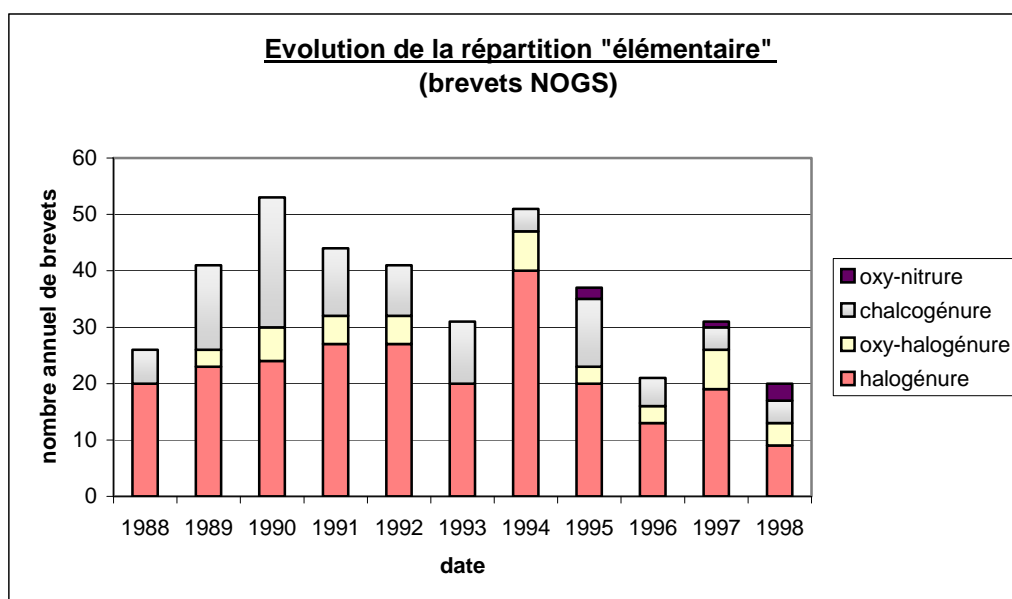
Une telle répartition permet de comparer les communautés ISNOG et NOGS sous plusieurs aspects. Tout d'abord en ce qui concerne la taille. Comme au niveau international les publications dédiées aux verres de chalcogénures sont plus nombreuses que pour les halogénures, on s'attend à une taille au moins double pour NOGS que pour ISNOG. Tentons un ordre de grandeur. Le tirage maximum des *NOGS news* au cours des années 1990 a atteint trois cents exemplaires. Chaque bulletin *NOGS news* étant théoriquement envoyé à une entité institutionnelle (laboratoire universitaire, R&D privé ou public), l'ordre de grandeur de personnes le lisant représente quelques milliers de personnes de par le monde (trois mille si on prend une dizaine de personnes par entité). Pour les congrès ISNOG, on est parvenu à un

maximum de deux cent participants. Si chaque entité délègue deux personnes en moyenne (c'était l'ordre de grandeur pour le premier congrès), on atteint une centaine d'entités, c'est-à-dire trois fois moins que pour les NOGS, soit environ un millier de personnes. Ces nombres fournissent des ordres de grandeur intéressants avec un facteur de un à trois pour la taille (qui correspond à peu près au rapport de publications entre les halogénures et les autres sur la décennie).

Ensuite, les centres d'intérêt ne sont pas équilibrés de la même façon : au dixième congrès ISNOG (1996), la répartition des communications orales indique encore 70% pour les halogénures, 25% pour les chalcogénures, 5% pour les oxy-nitrures, ce qui contraste avec la répartition de la communauté NOGS (50% pour les seuls chalcogénures sur l'ensemble de la décennie).

Enfin, au niveau de l'importance quantitative des Français dans les deux communautés, on trouve là aussi des différences. Pour les deux premiers congrès ISNOG, les Français assurent 30% (1982) et 20% (1983) des communications. Pour les NOGS, leur contribution est bien plus faible et diminue régulièrement de 1988 (9% des publications) à 1995 (3,5%) avant de se stabiliser autour de 5% (1996-2000). Deux facteurs jouent pour expliquer le fort impact sur les ISNOG : la spécialité des Français touche plus les fluorures que les chalcogénures (Rennes et Le Mans sont vraiment sur les fluorures pendant les dix premières années) et ISNOG est toujours plus orienté vers les halogénures ; les congrès favorisent toujours les groupes leaders comme celui de Rennes ou du Mans. En effet, comme le nombre de communications orales est contingenté, la sélection retient ceux qui sont considérés comme les meilleurs. Au delà des différences entre deux communautés, je voudrais souligner ici que les deux grands media (institutionnels) dont les scientifiques se sont dotés pour travailler – la communication orale et la publication écrite – n'ont pas le même sens : les publications dégagent des effets de masse (grand nombre de publications) tandis que les congrès favorisent une élite : quelques individus, qui sont considérés comme les meilleurs mais qui sont aussi dans les instances organisatrices (des congrès).

La deuxième série que l'on peut construire est le recensement des brevets. Sur la période (1988-1998), quatre cents brevets sont déposés (dix fois moins que les publications), dont près de 60% par des entreprises japonaises et 5% cent par les Français (universitaires seuls ou associés à Alcatel, France Telecom, CNET, Le Verre fluoré). Le schéma ci-dessous présente l'évolution de la répartition « élémentaire » des brevets déposés.



Pour les brevets – contrairement aux publications –, les verres d’halogénure (fluorure surtout) restent les composés les plus intéressants. En effet, la majorité des brevets sont déposés sur les verres d’halogénures (61%) et un quart seulement sur les chalcogénures. L’évolution du nombre de brevets d’une année sur l’autre est plus irrégulière aussi, comparée à la croissance régulière des publications. Ici, on repère une assez forte activité jusqu’au milieu des années 1990 puis un déclin progressif, qui coïncide avec une diversification des composés brevetés vers les oxy-halogénures et les oxy-nitrures.³⁹

Que peut-on déduire, de la comparaison entre publications scientifiques et brevets industriels, pour les relations entre science et société ? Posons pour simplifier que le dépôt de brevets rend compte d’une logique industrielle tandis que la publication répond à la seule logique universitaire. En première approximation, cette simplification est probablement correcte. Premièrement, les fréquences de dépôt de brevets et de publications diffèrent d’un ordre de grandeur : un brevet déposé pour plus de dix articles publiés. Ensuite, leurs évolutions ne suivent pas la même conjoncture. La baisse du nombre de brevets fait suite à la première crise des industries télécoms vers 1990, avec un retard de quelques années parce que les brevets continuent d’être déposés sur les études en cours au début de la décennie, la restriction budgétaire ne se faisant sentir sur le dépôt de brevets qu’après 1995. D’autre part, tout au long de la période, les espoirs d’applications nouvelles pour les halogénures diminuent fortement parce que les fibres de fluorures sont suffisamment bien maîtrisées à courte distance et ont été abandonnées pour les longues distances. Ainsi, le nombre de brevets baisse tandis que celui des publications continue de croître. Les chalcogénures ont acquis un intérêt scientifique fort alors même que leur intérêt industriel reste faible.

Dépôt de brevets et publications scientifiques n’ont pas la même signification (VI.3.2). Vue de l’industrie, la recherche scientifique présente une forte d’inertie : elle peut être lancée sur financements industriels (VII.1.2), mais, lorsqu’elle est lancée, même si la manne industrielle se tarit, elle continue de produire dans la même veine. Pour un universitaire, il est plus facile de publier sur un sujet maîtrisé, aussi aura-t-il tendance à faire fructifier son savoir-faire au maximum avant de passer à autre chose. Réciproquement, vue de l’Université, l’industrie paraît bien volage. Aux premiers signes de récession, là voilà qui oublie le pic d’adrénaline qu’elle a connu quelques années auparavant. Le scientifique, quant à lui, poursuit ses spéculations sur les chalcogénures même si l’industriel ne dépose pas de brevets dans ce domaine.

On peut suivre le désintérêt industriel par une diminution du nombre de brevets mais aussi par une baisse de financements (aux recherches universitaires) et un désengagement progressif des incitations. Le reflux industriel à la fin des années 1990 est sensible au niveau du financement de la société NOGS. À son lancement, celle-ci emploie une seule personne, la responsable de la publication des *NOGS news*. Même modeste, son salaire – trois à quatre mille francs par mois en 1987 (soit sept cents euros 2006) – et les cotisations sociales représentent 80% des dépenses annuelles, qui s’élèvent à 106 000 francs 1987 (23500 euros 2006). Les fondateurs de la société pensaient pouvoir équilibrer les dépenses grâce à la cotisation des adhérents (28700 francs) et aux sponsors privés (11200 francs). Dès le huitième mois pourtant, la société est en sursis : il manque 66 000 francs pour finir l’année [NOGSn, 1987, n°5, p. 3]. Pour ne pas augmenter la cotisation des particuliers, le comité de la société

³⁹ Les dates des premiers brevets oxy-halogénures (1989) et oxy-nitrures (1995) sont les mêmes que pour les publications. Une telle coïncidence questionne la pertinence des données sources : les nouveaux types élémentaires n’apparaissent-ils pas à ces dates-là juste parce que la bibliographie les intègre à partir de ces années-là ? On peut se rassurer en disant que si on les inclut, c’est qu’ils sont devenus pertinents pour les acteurs.

lance un appel à contribution aux riches et généreux donateurs industriels. De trois sponsors en janvier 1987, on passe à une douzaine, au printemps 1988, parmi lesquels quatre multinationales états-uniennes et trois japonaises. Le CNET est le seul organisme public présent.⁴⁰ Les sponsors se font donc un peu prier mais ils contribuent finalement à la survie la société NOGS. Quatre ans plus tard, en janvier 1992, ils ne sont plus que sept puis leur nombre décroît régulièrement jusqu'à la disparition de la société à la fin de 1998 (il reste alors deux sponsors : NTT et Galileo Electro-optics Corp).

Pour conclure, on peut se demander qui sont les gens qui composent la communauté NOGS. Leur intérêt commun réside dans les verres non conventionnels, en particulier les fluorures et les chalcogénures. Ils sont universitaires, industriels privés ou publics, chimistes, physiciens ou *Materials scientists*, verriers ou solidistes. L'appartenance est floue – on entre, on sort sans frapper même si on paye une obole pour y être –, l'organisation est lâche – il n'y a pas de grand-messe, de réunions annuelles –, mais l'échange se veut permanent – on s'écrit, on se téléphone, on fait la fête –. Les référents identitaires sont multiples par les métiers, les pays même si l'anglais scientifique tend à devenir la langue commune. Ce qui une nouvelle fois étonne est la multiplicité culturelle des individus. Les *NOGS news* par exemple font annuellement la promotion et le compte rendu de réunions internationales aussi différentes que :

- des congrès matériaux : de la *Materials Research Society* (session « *optical fiber materials and processes* ») ou l'« *International conference on solid state ionics* »,
- des congrès de chimie : ceux de l'*American Chemical Society* (« *glass division* » puis « *glass and optical materials* » à partir de 1991) ou l'*International symposium of solid state chemistry* (le second a lieu en 1989),
- des congrès de physique : « *International conference on the physics of non-crystalline solids* », « *International conference on non-crystalline semiconductors* »...
- des rencontres proposées par des industriels : l'Union scientifique continentale du verre (28-29 juin 1990, à Fontainebleau organisée par le CNET et Philips),
- des conférences de l'OTAN (« *halide glasses for IR fiberoptics* »).

D'autre part, les revues les plus proches de la communauté sont *Materials science forum*, qui a édité les deux premiers actes ISNOG (dont Moynihan et F. Benière (Rennes) sont parmi les onze « *editorial board* ») et le *Journal of Non Crystalline Solids*, qui a pris le relais à partir du troisième (Frischat et Lucas sont parmi les cinq « *regional editors* »).

Une telle diversité décontenance le sociologue en mal de classifications. Certes, les congrès ISNOG constituent une référence commune pour la communauté NOGS, surtout à partir de sa réorientation au début des années 1990. Mais comment proposer une structure qui rendrait compte d'un tel foisonnement ? Chaque individu, chaque laboratoire, chaque nation favorise tel congrès, telle rencontre.⁴¹ Intersection de multiples cultures scientifiques, la

⁴⁰ Par ordre d'arrivée, ce sont : Kokusai Denshin Denwa Co., Ltd (Japon), Corning Europe (France), Dupont de Nemours (USA), Central Glass Technical Center (Japon), E. Merck (RDA), Saint-Gobain (France), Owens-Corning Fiberglas Corp. (USA), Galileo Electro-Optics Corp. (USA), NTT Corp. (Japon), CSELT (Italie), CNET (France), seul investisseur public [NOGSn, 1988, n°9, p. 3]. D'un autre côté, deux des trois premiers souscripteurs : Thomson-CSF (France) et Information Gatekeepers (USA) se sont déjà retirés.

⁴¹ « *PT: A quel type de congrès allez-vous ?* – JA : Typiquement, ce sont des congrès matériaux comme l'*American* ou l'*European Ceramics Society* ou le congrès de la *Materials Research Society* aux États-Unis. Nous sommes aussi très présents dans les congrès de photonique qui sont à l'interface entre matériaux et dispositifs optiques, et bien sûr les congrès spécifiques au verre : ISNOG [*International Symposium on Non-Oxides Glasses*], ICG [*International Congress on Glass*]... » [I Adam, 2006, p. 7].

communauté NOGS constitue ainsi une fragile tentative pour fédérer un groupe de personnes focalisées sur un thème – les verres non conventionnels –, à l'intersection de sphères économiques et de disciplines scientifiques différentes. Sa raison d'être s'appuie sur l'idée naïve qu'un échange transparent favorise l'ensemble de la communauté, ce qui profite à chacun des membres (ou au moins de ses membres les plus influents). Du cœur à la périphérie de la communauté NOGS, on repère une succession de cercles concentriques. Un noyau dur associe les membres du bureau de la Société et leurs collaborateurs (soit une cinquantaine de personnes ; pour la France : Rennes). Une première couronne correspond à une trentaine de laboratoires de recherche, proches du noyau dur, qui participent soit aux ISNOG, soit à la mise au point collective des fibres optiques fluorées (trois cents personnes ; pour la France : Alcatel, CNET, le Mans). Une deuxième couronne comprend les sponsors privés des *NOGS news*, les laboratoires R&D d'une douzaine de multinationales, qui sont suffisamment investies pour donner une obole (soit entre cent et quelques centaines de personnes). Enfin, une troisième couronne correspond aux sociétaires de NOGS (une à deux mille personnes qui publient ou brevètent dans le domaine des verres non conventionnels mais dont je n'ai pas mentionné une seule fois le nom).

VII.3. Le complexe scientifico-industriel : de la start-up à l'organisme supranational

Après avoir successivement décrit l'essor d'un laboratoire – celui de chimie minérale D à Rennes – grâce à l'invention des verres de fluorure (VII.1), puis la mise en place d'une communauté hybride soutenue par la « triple hélice » Université-industrie-État (VII.2), je voudrais disséquer quelques-uns des rouages par lesquels un laboratoire universitaire de chimie des solides peut participer d'une logique capitaliste plus vaste, s'inscrivant dans le « complexe scientifico-industriel » (VII.3). Je décrirai un nouveau projet qui se développe à Rennes à partir de 1984 et tenterai de démêler les causalités à l'œuvre au travers des frontières sociologiques. Même si cette coupe transversale se veut plus « intimiste », elle s'appuie sur les ressorts de la communauté des verres non conventionnels et participe en retour à leur activation.

VII.3.1. Un projet militaire appliqué qui stimule la créativité chimique (1984-1986)

Au début des années 1980, les fibres optiques fluorées commencent à être commercialisées pour des applications "courte distance" (VII.2.2.1). La start-up Le Verre fluoré lancée par les « Rennais » à la fin des années 1970 se montre performante mais les universitaires s'en désintéressent assez vite. Elle leur a permis de s'orienter vers les procédés mais leur a fait comprendre aussi que les enjeux technologiques des verres de fluorures sont désormais moins cruciaux. Les applications "longue distance" ne pourront sans doute pas voir le jour à cause d'une exigence trop forte en matière de pureté. En revanche, les verres de fluorures ont convaincu que les verres non conventionnels permettaient d'élargir la fenêtre de transparence optique de part et d'autre du visible entre 0,2 à 8 micromètres [NOGSn, 1991, n°31, p. 2]. Le Laboratoire de chimie minérale D a d'ailleurs conclu plusieurs contrats avec la DGA qui ont permis d'acheter du matériel et de financer des thèses sur les fluorures. En contrepartie, les militaires s'intéressent de près aux possibilités de transmission dans

l'infrarouge des verres non conventionnels. La vision de nuit est devenu un enjeu stratégique des guerres contemporaines. En 1984, la DGA propose à Lucas un nouveau projet dont le but serait d'élargir la bande de transmission vers les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire vers l'infrarouge. Les militaires s'intéressent en particulier à la « fenêtre 8-12 » (micromètres), qui correspond à un intervalle de transparence de l'atmosphère. Il s'agit donc d'augmenter la longueur d'onde de coupure de huit à douze microns afin de détecter les ondes électromagnétiques infrarouges sans perturbation de l'atmosphère.⁴²

Le projet séduit Lucas. Il a quelques idées en tête. La méthode de travail qu'il décrit comme étant la sienne est d'ailleurs assez originale. Même si la rationalisation a posteriori est profondément simplificatrice, elle donne quelques pistes intéressantes. Pour préparer ses synthèses chimiques, Lucas joue avec trois outils à sa disposition : le tableau périodique, la chimie descriptive et la cristallographie. Le tableau des éléments continue de jouer un rôle majeur pour le solidiste tourné vers la synthèse alors qu'il est moins crucial pour un physico-chimiste, occupé par la caractérisation physique. Son premier niveau de lecture est « linéaire » : en passant d'une colonne à la suivante, l'électronégativité augmente, d'une période à la suivante, l'électronégativité diminue et le rayon ionique augmente... Par linéarité, j'entends la modification d'une seule caractéristique « élémentaire » en se déplaçant horizontalement ou verticalement. Ce niveau de compréhension permet de raisonner par analogie, en substituant tel élément à tel autre pour obtenir telle modification des propriétés. C'est probablement ce que la plupart des solidistes entendent par le caractère prédictif de la chimie du solide (VI.2.2.3) : prédiction linéaire, à court terme, par analogie élémentaire dans un monde bidimensionnel.⁴³ Plus profond, moins explicite que ce premier niveau transparaît un deuxième niveau : celui d'une lecture diagonale. Plus intuitive, basée sur des discussions avec les collègues, elle consiste à « modéliser un peu [...] dans la tête » pour savoir quels éléments on va associer pour avoir telles propriétés structurales ou physiques. Il ne s'agit plus de sauter d'une colonne ou d'une ligne à la suivante mais d'une approche multidimensionnelle du tableau périodique. C'est ce que l'on appelle parfois l'intuition chimique : pas tout à fait due au hasard mais pas tout à fait explicitable non plus. Une lecture linéaire du tableau périodique laisse peu de chance à l'originalité chimique, même si elle autorise des prédictions performantes.⁴⁴ Le "Lego" chimique est beaucoup plus amusant quand on associe les colonnes à l'intuition.

⁴² « le paramètre déterminant était la transmission dans l'infrarouge, le plus loin possible en longueur d'onde. » [I Adam, 2006, p. 1]. « En 1984, il s'est passé autre chose, toujours en cheville avec la DGA – c'est eux qui avaient financé les verres de fluorure –. Les gens de la DGA m'ont dit : "écoute Lucas, tes verres fluorés, c'est bien mais ils coupent la lumière à 7 µm, or nous, on a besoin d'une technologie qui va jusqu'à 12 µm" tout simplement parce qu'il y a une fenêtre dans l'atmosphère qui va de 8 à 12 microns, un trou qu'on appelle la « fenêtre 8-12 » "tu ne pourrais pas essayer d'inventer un nouveau verre qui couvre la fenêtre optique ? parce que là tu auras des sous." » [I Lucas, 2006, p. 8].

⁴³ Ainsi Vivien, qui a surtout travaillé sur la spectroscopie du solide, a assez peu d'affinités avec le tableau des éléments comme il le dit lui-même. « *PT : A propos des éléments justement, j'ai l'impression qu'il y a un déplacement dans le tableau périodique. Vous êtes parti de la quatrième colonne, puis les lanthanides en allant vers les poids moléculaires les plus gros. Est-ce que cela aurait pu être une stratégie délibérée de votre part ?* – DV : Non, pas du tout. Je ne suis pas un fétichiste du tableau périodique des éléments. Encore que je lui reconnaisse quelques vertus. Cela a été tout à fait fortuit. » [I Vivien, 2004, p. 8]. « *PT : Vous raisonnez sur le tableau périodique ?* – JL : Oui complètement, pour moi c'est mon catéchisme, c'est d'une simplicité biblique si on connaît bien sa chimie, le tellure, le bismuth... » [I Lucas, 2005, p. 17]. « Vous savez la chimie prédictive, pour moi, elle est à court terme, à courte distance, je ne sais pas si on peut vraiment faire de la chimie prédictive. [...] Ah oui bien sûr quand on remplace un cation par un autre, pour moi, c'est de la prédiction à bon marché : on raccourcit les distances, on met un ion magnétique... » [I Étourneau, 2005, p. 8].

⁴⁴ « Si on n'a pas discuté avec les copains qui font ceci ou cela, on risque de se tromper. Moi je ne fonctionne que comme ça. [...] On ne tombe pas dessus par hasard » [p. 17] « On arrive à modéliser un peu mais ce n'est que dans la tête, à partir de l'observation du tableau périodique, je me dis : tiens, il y a sans doute des gens qui

Alors que le tableau périodique est statique, sa connaissance par le chimiste est dynamique au sens où elle évolue au cours d'une carrière grâce à l'expérience, au fil des synthèses réalisées, ainsi qu'au contact des collègues par discussions ou lectures bibliographiques. Or, selon Lucas, la chimie descriptive des années passées constitue une « mine » de renseignements pour qui sait les déchiffrer. De 1950 à 1980, d'innombrables composés solides ont été synthétisés de manière systématique sans souci d'applications, de propriétés physiques voire de caractérisations structurales. On trouve leur trace dans la bible française des années 1960 : *le Pascal* ou parmi les publications russes de la même époque. Quand on cherche à fabriquer des verres et qu'on relit les publications de l'âge d'or du solide cristallin, on a une grille de lecture performante : tous les solides « bizarroïdes » qui n'intéressaient personne durant les années 1960 (par manque de moyens de caractérisation aussi) deviennent source d'inspiration pour le solidiste des années 1980. Un spectre blanc, dépit du minéraliste des années 1960, constitue une jubilation pour le verrier des années 1980. Ce type de travaux – systématiques, descriptifs, fastidieux – est tombé en désuétude en une trentaine d'années avec l'avènement du triptyque structure-propriétés-applications. Rares sont désormais les solidistes qui tracent des diagrammes de phases. Pourtant, quand on lit ces anciennes publications avec un regard neuf, il est possible d'y trouver l'idée d'une composition chimique pour fabriquer un verre qui présente un fort potentiel en application.⁴⁵

Bien souvent, le composé solide n'est pas exactement celui qui convient mais on peut le prendre comme base de départ puis lui appliquer tout un savoir-faire en cristallographie. Raisonner par blocs, agencer non plus les atomes mais les groupes d'atomes, et changer mentalement d'abord puis matériellement ensuite dans la synthèse le bloc de base : un tétraèdre par un octaèdre, un octaèdre par un triangle. Les combinaisons se multiplient.⁴⁶ De la même manière que la détection de défauts structuraux par microscopie électronique a renouvelé la synthèse en permettant de fabriquer de nouveaux composés solides avec ces blocs de base (VI.2.1.2), de même que la modélisation de solides poreux se fait désormais sur les briques et non plus sur les atomes (VI.2.2.3), la cristallographie contemporaine associe des blocs pour trouver de nouvelles phases. Le tableau périodique avec ses cases élémentaires est réadapté suivant la brique structurale du cristallographe. Connaissance du tableau périodique et savoir-faire cristallographique participent d'une même recherche créative de nouvelles

n'ont pas encore essayé de faire ça, je fais un peu de biblio, je m'aperçois que quelques-uns l'ont fait mais ne savaient pas ce qu'ils faisaient. » [I Lucas, 2005, p. 18].

⁴⁵ « Je regarde aussi de très vieux bouquins – parce qu'il y a des gens qui ont fait de la chimie avant –, le *Pascal* par exemple, il y a des descriptions de manip, puis l'auteur écrit que le matériau était sous une forme bizarre, qu'il n'a pas diffracté aux rayons X mais le gars n'a pas vu que c'était du verre. On a une mine absolument gigantesque dans le boulot des Russes dans les 20 dernières années – malheureusement je ne lis pas le russe – à croire qu'il y a des régiments de types qui, au lieu d'aller en Sibérie, se sont retrouvés à faire de la chimie. Ils ont fait des trucs sans idées préconçues, ces gars-là ont laissé des traces de chimie qu'on ne va pas refaire mais dans lesquelles on peut puiser des tas d'infos. Sur le coup des tellures, honnêtement, la première piste, c'est un papier soviétique qui m'est tombé entre les mains de façon complètement indéterminée et en plus non traduit. Je ne l'ai pas fait traduire parce qu'il n'y a qu'une chose qui m'intéressait : c'était le diagramme de phases ternaire tellure-germanium-gallium. J'ai pensé qu'il y avait du verre dans ce diagramme. » [I Lucas, 2005, p. 18].

⁴⁶ « Ensuite, l'idée a été de jouer sur la géométrie : ce verre étant constitué de tétraèdres qui s'enchaînent les uns aux autres, pourquoi ne pas mettre des triangles, des éléments de chaînes linéaires ? En fait, je reviens toujours à ma culture de chimiste du solide : sur le côté structural, ce que je faisais aussi avec Collongues, on discutait de la structure dans l'espace. Je refais la même chose sachant que le réseau que je veux obtenir doit être aperiodique, c'est-à-dire qu'il doit être très flexible dans la liaison chimique. Un verre peut accepter d'être bousculé, on peut lui changer les angles de liaison sans qu'il se casse, c'est-à-dire que l'énergie de la liaison chimique n'est pas affectée. Pour la silice vitreuse, c'est comme ça : l'angle de la liaison Si-O-Si est de 148° en moyenne, mais ça peut être 120 pour l'une ou 165 pour une autre, il y a une très grande flexibilité dans le réseau. Je continue à raisonner comme ça, il n'y pas d'équation, il n'y pas d'ordinateur, c'est de la simulation macroscopique, de la modélisation avec les mains. » [I Lucas, 2005, p. 18].

structures, une « modélisation avec les mains » qui se nourrit en permanence de l'expérience du chimiste acquise par le passé.⁴⁷

Avec ses trois sources d'inspiration imbriquées, le chimiste du solide approfondit son approche « conceptuelle ». Il a pensé à de possibles synthèses, veut tester le tellure (Te) pour fabriquer de nouveaux verres mais n'est évidemment pas sûr des résultats. Il n'attend qu'une bonne occasion pour les tester à la paillasse. Le déclin relatif des fluorures et les intérêts militaires lui en donnent l'occasion. En 1984, Lucas accueille aussi un étudiant chinois, maoïste convaincu, venu enrichir les connaissances technologiques du régime : Xiang Hua Zhang ne rentrera jamais travailler en Chine populaire. Extrêmement brillant, l'étudiant se met au travail en suivant l'idée directrice de départ : synthétiser des verres d'halogénures de tellure. Tout se passe étonnamment bien et en l'espace de deux ans à peine de nouveaux verres binaires sont synthétisés : chlorure et bromure de tellure. Par l'ajout de sulfure ou de séléniure le thésard a mis en évidence de larges gammes de composition correspondant à des verres ternaires. La nouvelle famille est nommée « *Texglass* », dont l'acronyme TeX rend bien compte de la possibilité de décliner l'anion suivant différents halogènes (X) [NOGSn, 1988, n°13, p. 3].⁴⁸ Le premier point positif est l'originalité de la synthèse : les halogénures de tellure n'étaient pas connus même si les verres de chalcogénures étaient déjà largement étudiés. Le deuxième point est la jouissance que peut provoquer la réalisation matérielle d'une conception intellectuelle pour le chimiste. Enfin, dernier point, non le moindre : les propriétés optiques du matériau sont exceptionnelles. La « fenêtre optique » ouverte dépasse les espérances, entre deux et vingt microns environ. Même s'ils sont opaques pour les longueurs d'onde du visible – les verres apparaissent noir –, la conséquence immédiate est la satisfaction des payeurs, on imagine la joie des militaires...⁴⁹ mais on ne s'arrête pas en si bon chemin.

⁴⁷ Quand on parle tableau périodique à un cristalochimiste, il ne le renie pas mais l'associe immédiatement à son savoir en cristalochimie. « PT : *Est-ce que dans votre conception de nouveaux composés, vous utilisez le tableau périodique ?* – JG : Je crois avoir touché à tous les éléments du tableau périodique, qui sont entrés à un moment donné dans un des composés qu'on a étudiés. Mais oui : à l'heure actuelle, je travaille sur les oxydes de vanadium et sur les oxydes de molybdène, je me sers beaucoup de ce que je sais sur la cristalochimie du vanadium et du molybdène parce que l'un est de degré cinq, l'autre de degré six, on peut faire des balances. On peut ainsi créer des matériaux par substitution qui sont basés sur cette connaissance cristalochimique et qui parfois se révèlent être nouveaux. Si on fait par exemple du $\text{Ca}^{2+}\text{V}^{5+}$, je peux essayer de changer les propriétés en mettant un peu de Na^+ et en compensant la charge par du Mo^{6+} puisqu'un solide doit être électriquement neutre. Je peux maîtriser un peu les choses comme ça ou éventuellement créer un peu de non-stœchiométrie » [I Galy, 2006, p. 23-24].

⁴⁸ « Je pars sur des idées complètement conceptuelles, arrive un Chinois qui s'appelle Zhang, j'étais allé en Chine à l'époque, lui faisait le chemin inverse. Il était envoyé par le PC du coin, c'était un maoïste pur et dur, en 84, il ne fallait pas être dissident pour partir à l'étranger, il arrive avec sa casquette de Mao, très discipliné, très gentil et me dit : "j'aimerais bien faire une thèse chez vous mais je voudrais étudier les rayons X, la spectroscopie..." en gros, il venait là pour apprendre toutes les technologies et partir après. Je lui ai dit que ce n'était pas comme ça que ça marchait. Je lui propose un sujet que j'avais en tête depuis longtemps, des verres à base de tellure avec le financement tout récent de la DGA. Il a accepté même s'il ne savait pas trop ce que c'était. On a comme ça dans la vie 4 ou 5 bonnes idées. Là apparemment, c'était une bonne idée – parce que ce n'était pas de l'observation mais une idée – c'était les verres de chlorures de tellure. Le coup de bol, c'était que ce Zhang était un étudiant extrêmement brillant – il aurait été major de l'X ou de Normale en France – et bosseur. En l'espace de deux ans, on a découvert ces verres à base de tellures, les *Texglass* » [I Lucas, 2005, p. 9-10].

⁴⁹ Les *Texglass* « ont plus que satisfait la DGA puisqu'on a ouvert la fenêtre optique. Il avait l'inconvénient d'être tout noir, c'est-à-dire opaque dans le visible mais complètement transparent dans l'infrarouge jusqu'à 20 ou 30 microns. C'était formidable ! » [I Lucas, 2005, p. 10]. Un résumé sur les activités du Laboratoire paru dans les NOGS news précise en 1991 que la fenêtre ouverte varie entre 2 et 13-18 μm [NOGSn, 1991, n° 31, p. 2] tandis que le compte rendu de la thèse de Zhang indique une ouverture de la fenêtre optique jusqu'à 20 μm pour certains verres ternaires [NOGSn, 1988, n°13, p. 3].

VII.3.2. De l'invention à la start-up : comment réussir un transfert technologique ?

Au milieu des années 1980, le Laboratoire de chimie minérale D est composé d'une vingtaine de chercheurs, techniciens et étudiants, répartis en deux équipes focalisées sur un thème : la synthèse de nouveaux verres d'halogénures et l'optique laser des verres. La première équipe a fabriqué puis étudié différents verres fluorés : fluoro-« zirconate », « aluminate », « phosphate », « indate »... Les procédés sol-gel commencent à y être utilisés [I. Adam, 2006, p. 2; NOGSn, 1991, n°31, p. 2]. C'est ce groupe qui participait au « club informel » de discussions sur les fibres optiques fluorées lancé autour de 1980 (VII.2.2.1). En 1986, le club s'est d'ailleurs transformé en un groupement scientifique (GS) du CNRS, présidé par Lucas et réunissant les laboratoires du Mans, de Rennes et de Marcoussis (CGE) ainsi que celui de métallurgie thermodynamique (C. Bernard) à l'Institut national polytechnique de Grenoble (INPG). Deux fois par an, le groupement organise des réunions de travail d'une vingtaine de personnes avec ses membres et des représentants du CNET et du CEA [NOGSn, 1988, n°13, p. 1-2].

La deuxième équipe rennaise est focalisée sur l'insertion de terres rares au sein des verres de fluorures. Ce faisant, elle suit la « folie laser » des années 1980 qui a stimulé la recherche de nouvelles sources infrarouges (entre 1 et 1,5 μm). La méthode est devenue banale – insérer des éléments optiquement actifs dans des matrices solides – mais les « Rennais » l'adaptent à leurs propres matrices – les verres de fluorures –.⁵⁰ Ils participent d'ailleurs au début des années 1990 à un groupe de recherche interdisciplinaire du CNRS intitulé « PAVOI » (propriétés actives de verres pour l'optique intégrée), par lequel ils sont associés au Laboratoire des fluorures (Le Mans), au Laboratoire de physico-chimie des matériaux luminescents (Lyon) et au Laboratoire d'électromagnétisme micro-ondes et opto-électronique (INPG). [NOGSn, 1993, n°39, p. 1-2].

En synthétisant de nouveaux verres de chalcogénure, Zhang a ouvert la porte à un troisième thème porteur : synthèse, mise en forme et caractérisation de verres TeX, binaires, ternaires ou quaternaires [NOGSn, 1991, n°31, p. 2]. Ce thème suit la logique du laboratoire en développant des matériaux originaux. Les militaires, quant à eux, voudraient bien voir fabriquer des objets optiques et pas seulement des solides. Lucas veut continuer à faire de la science, c'est-à-dire conduire des synthèses originales, sans se tourner exclusivement vers les procédés et l'optimisation. Avant de publier leurs résultats, les universitaires ont néanmoins pris soin une nouvelle fois de protéger leur invention en déposant quelques brevets au nom du CNRS. Sur les conseils de Lucas, Zhang est embauché après sa thèse (1984-1987) comme « chargé de recherches » au CNRS. Une troisième équipe se structure ainsi autour des verres TeX à la fin des années 1980. Zhang, élevé au pays du dirigisme d'État, est fasciné par le commerce occidental, mélange subtil de libre-entreprise et de règles strictes. Finaliser un matériau amuse aussi Lucas, devenu plus familier avec le monde industriel depuis une vingtaine d'années. La DGA voudrait obtenir des « lentilles moulées » et propose des financements en ce sens. Le laboratoire universitaire accepte. Profitant de la manne de l'armement, il compte finaliser le matériau tout en poursuivant ses synthèses originales. Les largesses budgétaires des militaires ne s'y opposent pas pourvu que l'on obtienne des

⁵⁰ « PT : Comment en êtes-vous arrivé à utiliser des terres rares dans vos matériaux ? – JL : On peut dire que c'est la folie laser des années 80, on a fait comme les autres mais avec nos propres matrices de verre. Il y avait des tas d'appels d'offre pour de nouvelles sources à 1 micron, 1 micron 5. Pour les terres rares, on voyait bien que c'était des candidats de choix et on a suivi le mouvement mais avec nos bébés, on n'a pas pris les phosphates ni le YAG connus depuis longtemps. Ça embêtait des gens qu'on soit choisi pour faire des lasers alors qu'on avait fait des fibres. » [I Lucas, 2005, p. 20].

applications au final. Zhang et son équipe se mettent donc à travailler sur le moulage des verres. Comme pour les fibres optiques de fluorures (VII.2.2.1), il faut jouer sur la viscosité des composés de part et d'autre de la T_g pour mettre en forme des objets aux formes complexes sans dépenser trop d'énergie.⁵¹

Une dizaine d'années sont nécessaires pour finaliser les divers procédés, optimiser les formulations, maîtriser les paramètres optiques, thermiques et mécaniques (1986-1996). Les militaires payent sans discontinuer. Quand ils pensent que l'optimisation du matériau est suffisante, ils proposent aux universitaires d'en assurer la fabrication puis la commercialisation. Zhang est séduit par l'idée depuis longtemps, Lucas est d'accord pour participer à l'aventure sans renoncer à son laboratoire. Une deuxième start-up, Vertex, est alors lancée mais pose rapidement des problèmes administratifs parce que les règles de la fonction publique sont assez strictes : on ne peut être à la fois fonctionnaire et actionnaire, dans un souci d'indépendance. En tant que fonctionnaires, les universitaires ne peuvent donc pas être actionnaires d'une start-up. Or, en 1997, lorsque Claude Allègre est nommé ministre de l'Éducation nationale et de la recherche dans le gouvernement de Lionel Jospin, il juge qu'un certain nombre d'anciennes réglementations sont inadaptées aux évolutions de la science contemporaine et fait voter une « loi sur l'innovation » en 1999. L'une des conséquences de la loi est la possibilité pour les universitaires de devenir actionnaires. Zhang démissionne du CNRS pour diriger la start-up, Lucas entre pour 10% dans le capital, le reste étant apporté par les collectivités locales (Conseil régional de Bretagne) et des investisseurs privés (des banques, Joint Venture, UMICORE...)⁵²

Un capital, un savoir-faire, un objectif : les brevets ne servent plus à rien. Le CNRS à court d'argent a d'ailleurs cessé d'entretenir les droits. La start-up ne se construit pas sur un droit commercial capitalisé mais sur un savoir-faire gardé secret, un tour de main savamment entretenu et renouvelé, la sueur du travailleur à la paillasse puis à l'usine. La décennie de recherche entretenue par la DGA n'a pas été vaine : on connaît la composition chimique optimale, on sait obtenir des lingots de quinze kilogrammes. Trois ou quatre employés travaillent à la start-up, Lucas y rejoint Zhang le soir quand il a fini sa journée au laboratoire. La fabrication pose des problèmes techniques, un à un patiemment résolus. À chaque nouvelle étape surgit une nouvelle embûche. On comprend que chaque tube, chaque ustensile varie d'un fabricant à l'autre et qu'une différence invisible conduit à des résultats tout à fait visibles, souvent pour le pire.⁵³ D'autant plus qu'en face, chez les commanditaires, on a des

⁵¹ « PT : Vous avez essayé de finaliser le produit au plan industriel ? – JL : Je leur ai dit que les produits industriels, ce n'était pas trop mon truc mais Zhang était fasciné par cela. Après sa thèse, je dis au CNRS que j'avais vraiment un candidat très bon. Ils lui ont trouvé un poste de chargé de recherche au CNRS. On a eu des contrats avec la DGA pour étudier le moulage, etc.... j'avais alors entré dans ma tête non pas une logique de business puisque c'était Zhang qui avait l'esprit business mais l'idée d'aller jusqu'à un produit très finalisé. Ce produit très fini que voulait la DGA était des lentilles moulées, on devait développer un verre à mouler dans des formes très complexes pour éviter de passer dans des processus de tournage qui coûtent très cher. Avec Zhang, on a beaucoup bossé et on a bien rigolé pendant quasiment 10 ans depuis la fin de sa thèse en 1986-87. À chaque étape, tout marchait assez bien » [I Lucas, 2005, p. 10].

⁵² « la DGA nous a dit qu'il fallait qu'on produise : nous avons créé cette deuxième société Vertex, pour rappeler l'acronyme compliqué du verre en question. [...] Il y avait une situation invraisemblable quand j'ai créé la société : Zhang a démissionné du CNRS, moi je n'ai pas voulu, je dirigeais mon labo. À la question, "est-ce que Lucas peut mettre de l'argent dans la boîte ?", on regarde les statuts et la réponse est non parce que Napoléon avait dit qu'on ne pouvait être à la fois juge et partie, fonctionnaire et actionnaire. Arrive alors Allègre qui crée sa fameuse loi sur l'innovation et rentre dedans en disant que c'était se moquer de monde une telle interdiction. Et c'est vrai : on était autour de la table avec des banquiers, le conseil de Bretagne, Joint Venture qui disaient : "on met tant ! Et vous professeur Lucas ?" Moi, je ne peux rien mettre : ça fait nul, comme si je ne croyais pas à mon truc. Ainsi, grâce à l'entregent d'Allègre, on est passé en commission d'éthique où on nous a dit sans nous dire que c'était bon. Je suis entré pour 10% au capital. » [I Lucas, 2005, p. 10].

⁵³ « nous avons lancé la société sans brevets. [...] Sur les verres, à un moment, j'ai eu 20 brevets qui ne valaient absolument rien – nous les avons pris au début en 80, 82 – et coûtaient environ un million de francs par an au

« exigences drastiques » : la DGA mais surtout Sagem et Thalès, qui participent au projet, ont un cahier des charges extrêmement précis, une expertise très poussée, qui induit des contrôles omniprésents sur les matériaux. Tout ce qui observable est régi par des règles : les bulles sont proscrites, les défauts optiques farouchement descendus sous un seuil déclaré acceptable, les fragilités mécaniques interdites...⁵⁴

Par ce transfert de technologie réussi, le chimiste a changé de « métier » : il n'est plus crédité sur la base de ses articles mais « sur pièce ». La publication, traduction du travail de laboratoire, ne compte plus. Le client veut non pas des mots mais un objet auquel il pourra faire passer toute une batterie de tests. Or, l'objet, qu'on l'appelle matériau ou solide, est le plus souvent introuvable dans l'agora scientifique. En effet, si les expérimentateurs se croient les uns les autres, ce n'est pas parce qu'ils voient et caractérisent les objets des autres – qui restent le plus souvent dans les placards des laboratoires – mais parce qu'ils croient que la « reproductibilité » des travaux assure un degré de confiance suffisant.⁵⁵ Le paradigme d'universitaire et cognitif est passé à industriel et matériel. C'est sans doute là ce que l'on peut appeler l'« *engineering* » matériaux, mais dans une forme beaucoup plus poussée vers le produit commercial que lorsque Collongues l'employait. En parachevant successivement les diverses étapes technologiques – synthèse, mise en forme, expertise –, les chimistes rennais ont manipulé trois formes de matière – solide, matériau, produit (commercial) –. Ils ont ainsi voyagé de la recherche fondamentale aux applications, migrant d'un lieu à l'autre : paillasse, salle de réunions, bureau de banque, hôtel de ville ou de région, laboratoire R&D, usine de fabrication et traversant successivement les frontières de mondes différents : technologique, industriel, capitaliste, commercial.

VII.3.3. De la surveillance terrestre à la conquête de l'espace (2003-2015)

CNRS pour maintenir le portefeuille. Le CNRS, qui commençait à perdre pied à l'époque, a décidé de faire un grand nettoyage de son portefeuille et nous avons balancé tous les brevets de base. Il se trouve que deux ans après, nous avons créé la Société sur la base de brevets qui n'étaient plus payés et personne ne s'en est trop aperçu. [...] Nous avons plus fonctionné sur des savoir-faire, nous avons la société en disant à personne la composition des verres, tout en faisant des lingots de 20kg. » [p. 11] « nous avons passé avec Zhang des nuits blanches à la Société, on était à l'époque 4 ou 5 car nous ne pouvions payer que 3 ou 4 salaires. Nous sortions des gros lingots de verre de 15kg, tout marchait bien pour dix d'entre eux et puis le onzième cassait, on arrivait pas à le décoller de l'ampoule de silice, nous ne savions pas d'où ça venait et puis un jour, nous avons découvert que certains tubes de silice n'avaient pas la même provenance. Des petits trucs désespérants ! » [I Lucas, 2005, p. 11].

⁵⁴ « En face de nous, nous avons des gens qui sont intransigeants : la DGA mais surtout Sagem et Thalès. Il fallait que nos verres soient sans défauts, sans bulles, sans rien et nous savions très bien qu'ils allaient expertiser comme jamais nous ne serions expertisés. Nous avons appris un nouveau métier : ce n'est pas celui qui m'a le plus passionné parce que je suis plus fondamentaliste et créateur de matériaux mais j'ai trouvé intéressant de voir les exigences drastiques dans l'industrie pour passer un produit en commercial. C'est délirant le nombre d'étapes à franchir ! Nous avons mis un pied dans l'industrie en quelque sorte [...]. C'est un monde que je trouve plus que respectable – en ce moment, surtout – c'est le monde du transfert de technologie. » [I Lucas, 2005, p. 11-12].

⁵⁵ « Il y a un moment dans le domaine des matériaux où on vous croit sur pièce. » [I Lucas, 2005, p. 11]. « *PT : Supposons que vous arriviez à synthétiser des solides que personne d'autre n'arrive à synthétiser, les solides sont là !* – AM : Oui mais comment on sait que les solides sont là ? Il faut être clair : la science n'existe que par les publications ; les solides et les manips, personne ne les voit ! Il faut que tout ce qu'on fait soit par définition reproductible, c'est-à-dire reproduit par n'importe qui, n'importe où. » [p. 12] « la science n'existe que par les publications. Où sont les faits ? je ne sais pas mais les manips et les échantillons ne sont pas dans les publications. » [I Moradpour, 2006, p. 17]. « une expérience physique ne compte, ne tient qui s'il y a reproduction par un autre groupe. » [I Jérôme, 2006, p. 7]

La société Vertex parvient en quelques années à produire les lentilles moulées en verres de tellure. Son activité est rentable mais ses capacités de production sont encore limitées. Le défi technologique a été relevé, reste à produire pour déborder le concurrent direct qui vend des lentilles infrarouges au germanium. C'est justement le moment que choisit la multinationale UMICORE, le sus-dit concurrent direct, pour racheter la société Vertex à ses actionnaires (dont elle fait d'ailleurs partie), très contents – on les comprend – d'empocher un bénéfice pour le prix de leurs efforts. Avec une force de frappe bien supérieure à la start-up, l'entreprise va produire beaucoup plus en beaucoup moins de temps. Les lentilles moulées, commanditées par la DGA, dont les frais de développement ont été financés par le budget français de la Défense, essentiellement réalisées par des fonctionnaires (université et CNRS)⁵⁶ vont donc être vendues par la multinationale aux militaires mais aussi aux compagnies automobiles (BMW, Cadillac) pour leurs modèles haut de gamme.⁵⁷ Un projet, essentiellement financé sur des fonds publics (salaires des chercheurs, équipements et thésards par le ministère de la Défense) va permettre à un entrepreneur privé d'opérer de substantiels bénéfices. Si, financièrement, la balance globale profite très largement au dernier maillon de la chaîne (UMICORE) qui n'a pourtant rien créé d'original, chacun des maillons intermédiaires y trouve son compte : le ministère de la Défense peut s'enorgueillir de soutenir la recherche fondamentale ; la DGA a rempli son objectif puisque les lentilles moulées sont disponibles sur le marché ; l'Armée française va pouvoir les acheter à prix fort (alors qu'elle les a fait inventer) et justifier ainsi ses dépenses pour améliorer la vision nocturne de ses troupes ; le ministre de l'Éducation peut se féliciter d'une recherche utile ; les universitaires obtiennent des moyens supplémentaires, gagnent un peu d'argent, beaucoup de renommée et un joli prix (Innovation défense) ; le sociologue est content d'avoir trouvé une étude de cas aussi exemplaire. Qu'en est-il du premier maillon de la chaîne : le contribuable français ? Celui à très haut revenu aura la satisfaction d'avoir dans sa voiture un écran avec une vision de nuit quasiment aussi précise qu'en plein jour. Celui qui n'a pas les moyens de se payer une BMW à six cent mille euros aura l'illusion de se sentir mieux protégé et la désagréable sensation d'être plus surveillé puisque les caméras infrarouges, désormais d'un prix plus abordable, vont pouvoir fleurir toutes les rues de ses joyeuses agglomérations.

Au delà du succès de cette aventure industrielle, les chimistes du Laboratoire des verres et céramiques (renommé ainsi en 1992) ont bien l'intention de rester des

⁵⁶ On pourrait croire que le budget d'un tel laboratoire tourné vers les applications dépend beaucoup d'apports industriels. Ils sont de l'ordre du cinquième. Pour l'année 2002, le budget consolidé du LVC s'élève à 1,8 million d'euros (soit 2 millions d'euros 2006) et sa répartition est la suivante : 72% pour les salaires des permanents (41% de l'université et 31% du CNRS), 7% de crédits récurrents (publics) et 21% de contrats (publics ou privés) [RA LCV, 2002].

⁵⁷ « Cette société a été très *successful* et puis on l'a vendue 4 ou 5 ans après à un grand opérateur de matériaux infrarouge qui s'appelle UMICORE. C'est une boîte qui avait tout intérêt à nous acheter tout simplement parce qu'ils vendaient le matériau concurrent, c'est-à-dire le germanium, autre matériau transparent dans l'infrarouge pour fabriquer des caméras mais beaucoup plus cher : il y avait une logique totale. Ils avaient déjà pris des actions dans notre société quand elle était naissante, ils nous avaient repérés, ils étaient contents de rentrer dans le capital et nous-aussi – c'est une boîte de douze mille personnes, il y avait des sous –. À un moment, quand il faut industrialiser, il vaut mieux des groupes importants : ils ont une usine aux États-Unis qui doit produire quelque chose comme cent mille lentilles par mois ou par an pour les caméras que vous aurez peut-être un jour sur votre voiture si vous achetez une voiture de luxe – une BMW ou une Cadillac au moins – et qui sont des systèmes de vision pour vous assister la nuit ou par temps de brouillard. Ce sont des petites caméras très discrètes avec un hologramme qui apparaît devant votre nez comme ça et qui permet de voir les objets chauds. En pleine nuit, ça vous permet de voir une vache à 500m, une personne à 300m. C'est le gros *business* qui actuellement est en plein développement mais nous sommes dégagés. Nous avons tout vendu avec un bénéfice au passage, il n'y pas de raison. C'est considéré : nous avons eu le prix Innovation Défense pour ça. Notre cher ministre, Claude Allègre, ne tarissait pas d'éloge à notre égard : voilà un transfert de technologie réussi ! C'est une belle *success story* d'une quinzaine d'années. » [I Lucas, 2005, p. 10].

fondamentalistes. Leur grande force se situe entre synthèse et mise en forme mais ils restent à la page en améliorant les caractérisations structurales et spectroscopiques, qui n'intéressent pas vraiment les commanditaires industriels. Le laboratoire collabore avec des physiciens pour l'EXAFS, la RMN, la microscopie électronique. Il a même publié quelques modélisations sur les verres depuis 1990 même si les matériaux amorphes sont difficiles à modéliser. Malgré une focalisation très spécifique sur les verres non conventionnels, les chimistes rennais croisent les modes de la chimie des solides : les lasers et la chimie douce durant les années 1980, puis, très ponctuellement, les supraconducteurs à haute température critique et enfin, plus récemment, les « nano-matériaux ». ⁵⁸

Au début de l'année 2000, la bulle des télécoms éclate, ce qui finit de couper les crédits sur les fibres fluorées. L'activité du Laboratoire s'est d'ailleurs progressivement déplacée des verres de fluorures vers ceux de chalcogénures au cours des années 1990. La gamme de rayonnement infrarouge des corps terrestres ayant été atteinte par les verres TeX, l'effort financier des militaires se réduit. Les financements ont d'ailleurs évolué du secteur de l'armement vers l'automobile et la surveillance civile avec le marché des caméras de surveillance. ⁵⁹ Aller plus loin dans l'infrarouge, ce serait pour voir des objets très froids, qu'on ne trouve plus sur Terre mais dans l'espace. Qui s'intéresse aux objets extraterrestres ?

À part quelques ufologues et autres amoureux des étoiles sans le sou, la NASA et ses consœurs sont les principales observatrices de l'horizon extraterrestre. Or, depuis le début du millénaire, un ambitieux « Projet Darwin » a été mis en place par l'Union européenne et les États-Unis (qui, outre-Atlantique, s'appelle « *Terrestrial planet finder* » pour ne pas indisposer le puissant lobby créationniste). Planification à long terme, avec un lancement de fusée prévu pour 2015, le Projet Darwin a pour mission la recherche d'exo-planètes susceptibles d'abriter la vie. Or, les planètes – plus froides que les étoiles – ne rayonnent pas dans le visible mais dans l'infrarouge. Chercher directement le rayonnement infrarouge ne donnerait rien de probant puisque l'univers est rempli de rayonnements. En revanche chercher des raies d'absorption caractéristiques d'une atmosphère est plus aisé. La méthode employée consistera à embarquer un interféromètre très précis à bord d'une fusée spatiale. L'interféromètre devra pouvoir capter des ondes infrarouges à des longueurs d'onde bien spécifiques : 6, 9 et 14 microns (qui correspondent respectivement aux longueurs d'onde d'absorption de l'eau, de l'ozone et du dioxyde de carbone) sans être gênée par d'autres signaux électromagnétiques. En d'autres termes, le cahier des charges exige des verres avec des fenêtres de transparence localisées (à 6, 9 et 14 microns) et très étroites pour ne pas que le

⁵⁸ « PT : Vous ne faites pas d'étude de structure locale par exemple ? – JL : Si, bien évidemment mais c'est pour le fun, pour notre plaisir, le week-end ! On a étudié les structures locales, l'environnement des terres rares. La DGA ne s'intéresse pas à ce genre de choses et ne voudrait pas qu'on perde du temps avec ça mais on arrivait à justifier en disant que pour aller plus loin, il fallait connaître la structure locale. On a fait comme tout le monde : de l'EXAFS, des rayons X très poussés – on a été les premiers à sortir la structure des verres aux rayons X en faisant des fonctions de corrélation, de paires – mais il faut reconnaître que ces structures de verre sont très compliquées et des choses restent en suspens. On a fait de la modélisation vers 1990, de la dynamique moléculaire avec Austen Angel, on a fait de la RMN aussi. » [p. 16-17]. « Je me suis quand même trouvé pris là-dedans [les supraconducteurs à haute T_c] un jour en faisant des oxyfluorures, ça m'a permis d'aller à quelques congrès sur les supras. » [I Lucas, 2005, p. 14]. « PT : La microscopie électronique ? – JA : C'est important oui, on s'en sert plus pour la caractérisation chimique comme sonde, pour étudier les surfaces. Comme on s'oriente de plus en plus vers les nano-matériaux, la microscopie électronique à haute résolution est un outil dont on a de plus en plus besoin. » [I Adam, 2006, p. 8].

⁵⁹ « Dans un premier temps, les chalcogénures se sont clairement développés grâce aux programmes militaires, mais les applications concernent aussi le civil avec les caméras de surveillance. Les caméras infrarouges pour l'aide à la conduite automobile de nuit constituent un exemple d'application remarquable : elles sont proposées sur les BMW depuis 2006. Enfin l'aérospatiale s'est montrée intéressée par des fibres optiques qui permettent de "voir" l'infrarouge dans l'espace. » [I Adam, 2006, p. 3].

rayonnement (chaud) des étoiles à proximité ne viennent perturber la réception de signaux. La bougie doit rester visible à proximité du phare !

L'*European Space Agency* (ESA), ayant entendu parler des fameux verres de chalcogénures (TeX) par un industriel néerlandais, propose aux « Rennais » un contrat intéressant pour développer un nouveau verre qui remplirait le cahier des charges. Lucas, qui a déjà une idée en tête, accepte le défi et lance un thésard sur le sujet. Son idée, il l'a puisée dans une vieille publication russe – clin d'œil historique de la République soviétique à la NASA ? –. En particulier, c'est un diagramme de phases contenant du tellure qui a attiré son attention parce qu'il présentait un domaine amorphe. Après de nombreux tâtonnements, le solide est bientôt synthétisé puis mis en forme comme fibre optique.⁶⁰ Schéma devenu classique de la méthodologie rennaise depuis une vingtaine d'années. Le chercheur n'est donc pas maître de l'orientation initiale, qui est fixée par des besoins industriels, mais il est éventuellement libre de refuser. En revanche, il est maître du matériau qu'il synthétise. De cette capacité à créer puis à mettre en forme dépendent les contrats : une thèse réussie et voilà cinq à six années de recherches financées. La création matérielle, que l'on appelle aussi scientifique, se situe ici à la conjonction d'un appel d'offre industriel et d'un savoir-faire de paillasse. Le matériau nouveau n'aurait pas été fabriqué si l'une des deux conditions n'avait pas été remplie. Et pourtant, le Laboratoire des verres et céramiques est reconnu comme un excellent laboratoire de recherche universitaire. Quel est alors le sens de l'expression « recherche fondamentale » ?

Pour revenir au projet Darwin, l'Union européenne et les États-Unis ont décidé de mener des recherches en parallèle puis, après un certain temps, de se réunir autour de la table pour choisir, pour chaque matériau, laquelle des technologies américaine ou européenne est la meilleure. Stratégie qui multiplie les solutions envisageables tout en réduisant les coûts au moment de la phase de production. Tout en nourrissant sa recherche fondamentale de financements à but appliqué, le chimiste créateur de matériaux se retrouve lui aussi embarqué dans une nouvelle aventure qui nous pose la tête dans les étoiles et fait rêver les enfants du monde riche.⁶¹

⁶⁰ « Dans les deux dernières années, on a trouvé une nouvelle famille de verre à base de tellure – brevetée depuis un mois – complètement conceptuelle. [...] On ne tombe pas dessus par hasard : on travaille actuellement avec l'ESA (*European Space Agency*) sur le « projet Darwin » dont la finalité est de voir s'il y a de la vie sur des exoplanètes. Aux États-Unis, ça s'appelle « *Terrestrial Planet Finder* ». Le but est de développer un interféromètre qui va être lancé dans l'espace en 2015 et qui va pointer ses capteurs vers l'univers pour voir si nous parvenons des signaux à 9 ou 14 microns (respectivement signaux d'absorption de l'ozone et du dioxyde de carbone – il y a aussi l'eau à 6 microns). L'interféromètre va ramasser ces signaux alors qu'il est en train de tourner autour d'une étoile – ce serait comme regarder une bougie à côté d'un phare marin ($1/10^6$) –. Il faut que les verres filtrent énormément et qu'ensuite soit fabriquée une fibre optique qui soit mono-mode à 6, 9 et 14 microns avec une configuration optique hyper sensible. On vient de réussir à le faire, il y a un mois. A 9 microns, on avait déjà le verre mais quand on m'a dit 14 microns, je n'y croyais pas mais devant l'insistance de l'ESA, j'ai mis un jeune thésard là-dessus. J'ai eu l'idée, qui a marché et maintenant, on a des verres qui vont jusqu'à 30 microns. C'est une aventure qui a tellement excité l'ESA qu'ils m'ont tout récemment donné un contrat pour faire uniquement de la chimie pendant au moins un an. On va mélanger du tellure avec ça, ça et ça, voilà ma stratégie chimique, on a déjà fait telle et telle étape, il reste ce pas-là et ce pas-là, je leur ai dit : "laissez nous faire de la chimie et j'espère que dans un an, nous aurons un verre fibrable." » [I Lucas, 2005, p. 17].

⁶¹ « PT : *Le projet global d'interféromètre est un projet commun aux Américains et aux Européens ?* – JL : C'est un truc que je trouve pas mal : ils ont décidé de travailler indépendamment de leur côté pendant 5 ou 6 ans puis, pour réduire les coûts qui doivent être gigantesques, ils ont décidé de choisir une technique soit européenne, soit américaine dans les différentes parties du projet. J'ai bon espoir pour notre découverte, je suis content parce que je pense qu'on est parti pour 5-6 ans de recherche financée, uniquement du fondamental et du long terme. C'est de la création de nouveaux matériaux avec un appel d'offre, on va dire. Si j'avais dit à mon gars, tu cherches un verre qui transmet jusqu'à 30 microns, ce n'était pas forcément intéressant parce que les gens s'intéressent en général aux verres qui vont jusqu'à 12 microns (c'est-à-dire les caméras thermiques). Quand on va plus loin en

Conclusion : Quelle recherche universitaire pour quelle société dans l'avenir ?

Le Laboratoire de chimie minérale D (1966-1992), devenu Laboratoire des verres et céramiques en 1992, présente une trajectoire à la fois caractéristique d'une époque et fort originale au sein de la chimie des solides. Implanté à Rennes, dans l'un des centres historiques de chimie du solide française (Rohmer, Hagenmuller, Prigent, Sergent, Lang, Grandjean), il se met rapidement au diapason de la communauté des années 1960, développe une cristallographie des structures pyrochlores et subit la loi des mandarins. Au début des années 1970, une synthèse de fluorozirconate conduit à l'obtention inopinée d'un verre. Intrigués, Jacques Lucas et son thésard, Marcel Poulain, décident de poursuivre l'investigation de ces composés amorphes qui leur paraissent inédits. À l'âge d'or des solides cristallins, cette décision constitue un manquement au paradigme communautaire. Lucas, suite à cette expérience, ne cesse d'insister sur l'importance de l'« anomalie » en sciences. Il n'est pas le seul : savoir repérer une anomalie quand elle se produit et l'interpréter est l'une des qualités déterminantes du chercheur.⁶²

La dissidence aurait pu se faire sans bruit si les publications des Français n'avaient attiré l'intérêt de quelques industriels des télécommunications. Jusque-là la silice convenait à la fabrication des fibres optiques mais posait néanmoins un problème d'atténuation forçant à intercaler régulièrement des amplificateurs de signaux sur les longues distances. Des spéculations théoriques avaient convaincu que des verres d'halogénures permettraient de résoudre le problème. En 1974, portée par l'espoir de renouveler toute l'industrie de la fibre optique en remplaçant la silice, toute la communauté industrielle des télécoms fait le siège de la « chaumière bretonne » pour en savoir plus. C'est le début d'un vaste programme de recherche international sur les verres de fluorures puis d'halogénures. Au Laboratoire, on profite de la dynamique enclenchée et du savoir-faire en synthèse pour multiplier les contrats avec deux gros commanditaires : la Direction générale de l'armement (DGA) et la Compagnie générale d'électricité (CGE). Avec les fonds investis, les industriels convainquent les universitaires du caractère crucial de la mise en forme : un solide n'est rien s'il ne devient pas matériau dans un premier temps, puis finalement produit commercial. Parti d'une cristallographie performante, le Laboratoire abandonne rapidement la diffraction des rayons X au profit de nouveaux instruments de caractérisation thermodynamiques et optiques. Synthèse, mise en forme, caractérisations optiques et thermodynamiques deviennent les activités quotidiennes des chimistes de Rennes.

Cette activité locale se développe dans des réseaux sociaux de plus en plus étendus. Horizontalement, elle s'inscrit dans un réseau technique d'une vingtaine de laboratoires de recherche (universitaire, public et privé) dont le but est la mise au point de fibres optiques fluorées. Par des échanges soutenus et des relations conviviales, on parvient à se fixer autour d'une composition chimique optimisée pour la fabrication de fibres pour la transmission à courte distance. Verticalement, le Laboratoire s'inscrit dans le réseau de financement d'une

longueur d'onde, c'est pour regarder des objets très froids, je savais que le seul client potentiel était l'ESA mais je ne connaissais pas leur projet. Ce sont eux qui sont venus me chercher, ils ont entendu parler de moi par TNO en Hollande. On est sur une affaire spatiale qui peut-être fera du bruit dans dix ans, si c'est un bout de verre de Rennes qui est embarqué dans Darwin et découvre un jour qu'il y a de la vie dans l'univers, ça c'est excitant ! » [I Lucas, 2005, p. 17-18].

⁶² « C'est un enseignement intéressant : très souvent, on réussit à trouver ce qu'on ne cherche pas et l'on ne trouve pas ce qu'on cherche. » [I Jérôme, 2006, p. 2-3].

recherche appliquée par des organismes d'État (DGA, CNET, CEA) et des investisseurs privés (CGE, Saint-Gobain), convaincus de la viabilité économique des verres de fluorures. À la conjonction de ces deux réseaux – technique-horizontal et financier-vertical – émerge une communauté scientifique de verres d'halogénures, caractéristique du modèle de la « triple hélice » [Etzkowitz & Leydersdoff, 1998]. Dynamique mais floue, cette communauté structure son activité autour de congrès internationaux organisés tous les dix-huit mois à partir de l'été 1982. Orientée par le groupe des pionniers solidistes (Rennes, RADC, STEL...), elle se diversifie néanmoins : de la chimie du solide à l'optique physique, des verriers aux théoriciens des matériaux. Plutôt que d'interdisciplinarité, elle se réclame de « pluridisciplinarité », un espace où chacun reste spécialiste d'un domaine très pointu tout en collaborant avec les disciplines connexes [RA LVC, 2002]. Dans une telle perspective, l'institut de recherche autosuffisant (VI.3.1.3) paraît assez improductif parce que, en s'efforçant de maîtriser toute la chaîne, il s'isole au lieu de s'ouvrir et perd la créativité induite par la rencontre avec des mondes différents.⁶³ Globalement, les rôles sociaux sont bien définis entre industriels payeurs (privés et publics) et chercheurs producteurs. États-Unis et Europe (Royaume-Uni et France surtout) constituent les deux pôles de recherche les plus vivaces et les plus nombreux tandis que les industries japonaises injectent beaucoup d'argent et déposent de nombreux brevets (60% du total au cours des années 1990). Pourtant, malgré tous les efforts entrepris et l'argent dépensé, les fibres optiques fluorées n'ont pas supplanté la technologie préexistante basée sur le plus conventionnel des verres : la silice.

Débordés par une inflation de publications nouvelles et affaiblis par le déclin relatif des fluorures, certains pionniers réagissent en essayant d'agréger les verres de chalcogénures à leur communauté. Le glissement est progressif à partir du milieu des années 1980. L'un des signes forts de cette stratégie est la création, fin 1986, d'un outil de communication supplémentaire, les *NOGS news*, dont le but est l'échange entre toutes les personnes intéressées par les verres non oxydés. Localement aussi, la plupart des laboratoires pionniers qui restent dans le domaine commencent à développer des recherches sur les chalcogénures. Rennes ne fait pas exception et diversifie, grâce à un projet militaire, sa zone de compétence à partir de 1984 en inventant les verres TeX, halogénures de tellure. Stratégie payante qui permet aux pionniers de se replacer au cœur d'un ensemble plus vaste : celui des verres non conventionnels associant halogénures, chalcogénures puis oxy-halogénures (à partir de 1989) et oxy-nitrures (à partir de 1995). Au début des années 1990, les congrès des verres d'halogénures se réorientent aussi progressivement vers les chalcogénures devenant en 1994 les *International Symposium on Non-Oxide Glasses* (ISNOG). Il s'agit de lutter contre la perte d'intérêt scientifique des multinationales des télécoms occidentales, avides de dividendes. En se décentrant des verres d'halogénures pour se redéployer sur l'ensemble des verres non conventionnels, la communauté s'est fortement réorganisée en agrégeant un domaine aussi vaste que le leur et en perdant nombre de laboratoires. À la fin des années 1990, Lucas et ses collaborateurs sont quasiment seuls parmi les pionniers à être encore dans le comité d'organisation ISNOG. Preuve que le programme de recherche rennais est l'un des rares parmi les laboratoires du début à être focalisé sur les verres non conventionnels durant plus de

⁶³ « Je préfère rester dans mon domaine de compétence là où je peux me défendre et même attaquer [...] La moitié de ma renommée, c'est à mes collègues d'optique, télécommunications et infrarouge, que je la dois et pas à ceux de ma communauté de chimie du solide. Si je suis original dans le bloc de la chimie du solide, c'est à cause de ça, c'est que j'ai passé la moitié de mon temps avec des opticiens qui me l'ont bien rendu. Je pense que si les mecs de Bordeaux, au lieu de vivre entre eux – parce qu'à Bordeaux on est sensé tout faire, une organisation *self consistent* –, étaient allés voir les mecs de la physique du solide, ça aurait changé des trucs. Hagen me disait de ne pas aller voir les physiciens parce qu'ils risquaient de me prendre quelque chose. Je sais qu'avec les physiciens, on est gagnant et eux aussi parce qu'on ne sait pas faire les mêmes choses, ils ne copieront pas, ils ne savent pas faire de la chimie. » [I Lucas, 2005, p. 19-20].

trente ans. Les autres, moins impliqués, sont plus volages tandis que le Laboratoire des verres et céramiques reste attaché aux matériaux qui ont fait sa gloire.

Les verres non conventionnels en nécessitant un savoir-faire très spécifique ont été favorables au transfert de technologie. Les chimistes rennais, universitaires bien intégrés à la communauté de chimie du solide au début des années 1960, ont réalisé en une vingtaine d'années deux transferts technologiques réussis : les verres de fluorure pour les transmissions à courte distance et les verres TeX pour la vision nocturne dans l'infrarouge. Ceci est plutôt rare parmi les solidistes français, qui ont déposé pas mal de brevets sans obtenir quoi que ce soit en retour (VI.3.2.3). Que ce soit au niveau du CNRS ou de la chimie du solide, il semble que l'option start-up ait le vent en poupe au début du millénaire. Cette solution associe étroitement la start-up au laboratoire d'origine pour l'expertise technique.⁶⁴ Le savoir technologique a pénétré le programme de recherche des universitaires. Si la mise en place de la communauté des verres d'halogénures a partiellement émancipé le Laboratoire vis-à-vis des solidistes français, c'est à la fois pour la reconnaissance internationale, les contrats budgétaires mais encore le renouvellement des méthodes de recherche. Par son positionnement à cheval, le Laboratoire a conservé et même consolidé une synthèse originale tout en développant des compétences nouvelles pour la mise en forme des solides. En focalisant son originalité sur la création en synthèse de composés non cristallins et en modifiant le paradigme des années 1970 (chapitre III) par l'introduction de la mise en forme, le Laboratoire de chimie minérale D s'inscrit pleinement dans le mouvement de « chimie des solides » (VI.1, VI.2). D'ailleurs, son activité de recherche croise les modes de la fin de siècle : laser, supraconducteurs, nano-matériaux. Au passage, on peut mesurer toute la différence entre deux composés solides : les oxydes supraconducteurs, qui sont restés des « curiosités de laboratoire », et les verres de chalcogénures, devenus des produits commerciaux. C'est tout le chemin qui va de la chimie du solide à l'« ingénierie matériau ».⁶⁵ Car, le laboratoire rennais est l'un de ceux qui a poussé la logique appliquée aussi loin – ce en quoi il est une exception – sans scinder son activité en deux parce que les deux aspects – fondamental et appliqué – sont pratiqués au quotidien, au sein des mêmes équipes, par les mêmes personnes. Il n'avait d'ailleurs pas vraiment le choix dans la mesure où sa taille était trop faible. La situation a été bien différente pour le Laboratoire des terres rares scindé en 1977 parce que ses équipes s'étaient spécialisées soit dans l'appliqué, soit dans le fondamental (VI.3.1.2). Au sein de son programme de recherche local, le laboratoire rennais a fait coexister une tendance matérielle et industrielle (mise en forme, fabrication d'objets) avec une tendance cognitive (synthèse originale). Équilibre on ne peut plus instable qui pose la question brûlante de la distinction entre recherche fondamentale et appliquée, et par conséquent entre science et société.

⁶⁴ En septembre 2007, le site Internet du CNRS annonce la création de deux cents start-up issus du CNRS depuis 1999 et estime à trente le nombre de nouvelles créations par an. Ce comportement général est corroboré par Rousset au niveau de la chimie des solides : « ce qui a été important ces dernières années c'est la création d'entreprises. Un ingénieur d'études de notre laboratoire, qui était fonctionnaire, a créé sa société il y a six ans. Il travaille sur les mêmes activités que nous mais plus en aval. Une autre personne, qui était professeur associé chez nous et qui avait déjà dirigé une entreprise, en a recréé une autre sur les biomatériaux. Ces deux sociétés s'appuient beaucoup sur notre laboratoire. À un moment donné, c'est plus à des entreprises qu'à des labos de faire le pas vers la valorisation et le transfert. Par contre, nous sommes toujours là pour résoudre des problèmes, participer à des études de longue ou moyenne durée. » [I Rousset, 2006, p. 9].

⁶⁵ « Pour moi, c'est le gros coup de la chimie du solide des quarante dernières années. – PT : Y a-t-il eu des applications pour ces supraconducteurs à haute température critique ? – JL : Un jour j'avais dit à Bernard, "il faudrait quand même que ces solides deviennent des objets industriels." Et puis ils ne sont jamais devenus des applications, ils restent des curiosités fascinantes mais personne ne vend des supraconducteurs à haute température. Il manque maintenant toute une ingénierie matériau. » [I Lucas, 2005, p. 14].

Lucas s'autodéfinit comme un chercheur fondamental. Que signifie cette expression quand, comme Lucas, on navigue de la paillasse aux bureaux des banques, du cours d'amphithéâtre au conseil scientifique de Dupont de Nemours, de la direction d'un groupement scientifique à la supervision de l'industrialisation de lentilles moulées ? Il est clair que ce terme ne signifie en rien un refus de l'utilité économique, ni une indépendance de la recherche. L'enchaînement qui de la paillasse du chimiste conduit au capital de la multinationale a été partiellement mis en évidence ici. Les deux bouts de la chaîne restent cependant bien distincts: ainsi le mouvement de production scientifique est moins directement réactif à la conjoncture économique que ne l'est celui du dépôt de brevets (VII.2.2.3). Ce qui importe c'est de repérer dans quelles circonstances et dans quel contexte un chercheur s'autoreprésente comme un chercheur fondamental: la mise en forme est devenue indispensable aux chimistes rennais à partir de 1980 alors que dix ans plus tôt, engoncés dans le paradigme solidiste, ils l'auraient probablement considérée comme de la recherche appliquée. Or, ils se disent (et sont dits) fondamentalistes grâce à leur synthèse originale. Celle-ci est rendue possible par les instruments, les thèses, obtenus par contrats industriels, qui sont la conséquence de leur savoir-faire en mise en forme. On voit que chaque élément du programme de recherche est lié aux autres. Si le Laboratoire rennais a la possibilité de mener une recherche fondamentale aussi originale, c'est parce qu'il est soutenu par l'argent des applications.

Ainsi, la distinction entre recherche fondamentale et appliquée est-elle toujours relative à un contexte. Elle procède avant tout de la manière dont les acteurs se représentent leur mission. Est fondamental (ou appliqué) ce qui est considéré comme tel par une communauté à un moment donné. Cette distinction permet de différencier des organismes de recherche (on se rappelle la différence entre le CIRIMAT et le CEMES à quelques kilomètres l'un de l'autre à Toulouse) mais ne se fonde pas sur des critères stricts et tangibles. Bref, elle relève du domaine des représentations, de l'idéologie.

Enfin, cette étude de cas est aussi exemplaire parce qu'elle pose de manière précise la question de la dépendance entre science et société. En dépit des mots d'ordre de la politique scientifique pour démultiplier les contacts avec l'industrie au cours des dernières décennies, l'indépendance reste une aspiration, un rêve de scientifiques en mal de pureté. Quelles relations sont souhaitables ou mieux souhaitées entre recherche universitaire et le reste de la société ? Le dogme utilitaire impose désormais au chercheur de justifier sans cesse son utilité⁶⁶ – question récurrente pour le thésard en sciences humaines –. L'utilitarisme actuel a renforcé l'emprise de la politique scientifique sur les orientations de recherche, ce qui est parfois vécu comme une contrainte pesante par les chercheurs. En période de crises (fin de la guerre froide, éclatement de la bulle télécoms) les capitaux privés se sont retirés du financement scientifique. Être viré ou non n'a dès lors plus rien à voir avec le mérite ou la qualité des recherches. Heureusement pour les chercheurs, les pouvoirs publics ont continué de les soutenir, « Quelle chance d'être au CNRS ! » dit-on alors [I Lucas, 2005, p. 14], et ont récupéré quelques-uns des migrants en provenance du privé.⁶⁷ On note cependant que la « société civile » n'est pas consultée lorsqu'il s'agit de déterminer les orientations à venir et que le fonctionnement de la recherche en chimie des solides ne répond guère aux critères d'une démocratie technique.

⁶⁶ « Pour les gens de votre génération, si on veut que continue ce métier formidable qu'est le métier de chercheur, il va falloir que la société accepte de payer et la société payera sur ce que les chercheurs sont capables de renvoyer à la société. Combien de fois m'a-t-on demandé : "à quoi vous servez ?" ? J'ai un bon dossier mais j'ai de nombreux collègues en chimie orga qui sont malheureux à ne pas savoir que répondre. » [I Lucas, 2005, p. 12]

⁶⁷ « J'ai vu les très bons chercheurs du solide américains comme Sleight passer à l'université. Les universités américaines – MIT, Harvard, Berkeley, Stanford... – se sont ramassés les tout bons des boîtes privées parce que les types ont senti que c'était fini, qu'il n'y aurait plus de recherche interne. » [I Lucas, 2005, p. 14].

Chapitre VIII.

Entre particularismes français
et alternatives occidentales

Chapitre VIII. Entre particularismes français et alternatives occidentales	507
<i>Introduction</i>	509
<i>VIII.1. Identités des acteurs de la chimie du solide française</i>	510
VIII.1.1. Un métier : spécialisation, hiérarchie et corporation.....	510
VIII.1.2. Une certaine idée des sciences chimiques.....	515
VIII.1.2.1. Chimie et physique sur les bancs de l'université	515
VIII.1.2.2. Au sein des sciences chimiques : d'une identité commune à des altérités profondes.....	522
VIII.1.2.3. De l'Université à l'industrie : influences et différences.....	529
VIII.1.3. Une épistémologie sociale de la matière	534
<i>VIII.2. Les alternatives occidentales : Europe et États-Unis</i>	536
VIII.2.1. Convergences et divergences en Europe occidentale.....	537
VIII.2.1.1. L'Allemagne : une tradition chimique séculaire	537
VIII.2.1.2. Quelques régionalismes en Europe de l'Ouest.....	543
VIII.2.1.3. Y a-t-il une identité européenne en chimie du solide ?	545
VIII.2.2. États-Unis : du solide aux matériaux, une autre grille de lecture ?	549
VIII.2.2.1. Rang, structure et objectifs de la <i>Solid State Chemistry</i> états-unienne	549
VIII.2.2.2. Quel positionnement de la <i>Solid State Chemistry</i> vis-à-vis de la <i>Materials Science and Engineering</i> ?	552
VIII.2.3. Vous avez dit « universalité » ? localités, effets de mode et individualités. ...	555
<i>Conclusion</i>	557

Introduction

La communauté française a été au cœur de l'analyse au cours des chapitres précédents. L'organisation nationale constitue un cadre historique pertinent pour la période considérée. En effet, malgré une rhétorique de l'universalité, la pratique des sciences reste profondément ancrée dans un contexte historique et social donné. Il s'agit, dans cet ultime chapitre, de faire une synthèse des particularismes français rencontrés durant l'étude puis de les mettre en regard d'autres situations dans le monde occidental.

Que ce soit à travers son activité professionnelle, dans sa vision des sciences expérimentales ou pour la représentation qu'il a de la matière, le « solidiste » français porte en lui de multiples identités qui le définissent et dans lesquelles il se reconnaît. Il est tentant de tracer le portrait-robot du chimiste du solide français de la deuxième moitié du vingtième siècle. Même s'il n'a pas existé en tant que tel, c'est bien de lui dont il sera question d'abord, de son identité, c'est-à-dire de ses altérités, rêves ou représentations, de son conditionnement aussi face à un désir immodéré de liberté. À travers les témoignages ou les comportements de nombreux personnages que j'ai rencontrés, je voudrais repérer quelques jalons identitaires des acteurs humains de la chimie du solide sur la période 1950-2000.

L'étude des composés solides par les chimistes n'est pas une affaire entendue, qui s'appellerait chimie du solide. Un aperçu des modalités sur ce qui se passe dans les pays voisins, en particulier l'Allemagne et le Royaume-Uni suggère-t-il d'autres voies, d'autres devenirs possibles ? Dans sa construction depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale, l'Union européenne a-t-elle été motrice d'une intégration des sciences chimiques du Vieux Continent ? Rien n'est moins sûr. Et que dire de l'organisation scientifique aux États-Unis, référence contemporaine pour les sciences expérimentales ? Comment s'articule là-bas la *Solid State Chemistry* (SSC) avec les *Materials Science and Engineering* (MSE) ? Les acteurs français interrogés ont des réponses à ces questions qu'il faudra confronter à d'autres études historiques. La parole vécue est-elle conciliable avec l'analyse historique a posteriori ?

VIII.1. Identités des acteurs de la chimie du solide française

VIII.1.1. Un métier : spécialisation, hiérarchie et corporation.

Dès le début de mon travail, j'ai souligné l'existence d'un système social bien particulier dans l'université française d'après-guerre : le mandarinat (introduction générale, II.1). En plaçant certains individus – les mandarins – dans le rôle d'oligarques scientifiques, cette structuration fait émerger autour d'eux des familles, voire des empires scientifiques. Cette identification à la famille constitue une part importante de l'identité de chercheur, à tel point que, parfois même, on utilise l'image biologique du « sang neuf » [I Tournoux, 2006, p. 12] pour évoquer un chercheur formé dans une autre famille. L'éducation clanique est si vivace en chimie du solide que non seulement l'on maîtrise sa propre ascendance – ce qui est courant – mais on connaît aussi la généalogie des autres membres du groupe. L'organisation de la recherche reste familiale ; or qui dit famille, dit école de recherche. En effet, le foyer familial ou laboratoire favorise un système de formation local et sédentaire – le maître commence par encadrer ses élèves à la paillasse puis les dirige pour leurs publications –, qui se perpétue de génération en génération, les aînés enseignant aux puînés. Un tel encadrement du savoir se double d'une structure pyramidale de pouvoir : un patron, quelques lieutenants de la première heure, des chercheurs, des étudiants... Entre jeunes et anciens se met donc en place une double hiérarchie savoir-pouvoir. S'il rêve de promotion sociale, le chercheur pourra aussi escalader les degrés de la pyramide. Mais certains ont plus le droit de rêver que d'autres : pendant très longtemps – jusqu'aux années 1980 –, mieux vaut être un homme qu'une femme pour augmenter ses chances d'ascension à la loterie sociale.

D'autres savent qu'ils n'ont pas même la possibilité de gravir les échelons hiérarchiques : les techniciens et personnels administratifs du laboratoire. Encore au milieu des années 1970, les rapports d'activité du CNRS, rédigés par des chercheurs, présentent les techniciens comme des « moyens » au même titre que les instruments. La distinction entre chercheurs et ITA/IATOS est « justifiée par l'affirmation qu'il est possible de distinguer clairement la science de la technique » [Lanciano-Morandat, 1999, p. 54]. Or, la culture française tend à dévaloriser la technique par rapport à la science, le manuel face à l'intellectuel. La distinction technicien/chercheur joue le même rôle de démarcation au laboratoire que la différence entre cadres et non cadres dans le secteur privé. Engagés pour occuper un poste technique, le non-chercheur doit se conformer à la spécification de son emploi. Localement, deux mondes antinomiques se côtoient au quotidien sans vraiment susciter de questions. Des oppositions duales se mettent en place, du type : obéissance/initiative, sédentarité/mobilité, répétition/diversité, savoir-faire/connaissance, pratique/théorique... Généralement, le technicien n'est pas autorisé à prendre part aux décisions stratégiques (politique ou organisationnelle) même si en pratique une secrétaire peut disposer de plus d'influence qu'un chercheur tombé en disgrâce. Savoir et pouvoir sont souvent considérés comme le pile et le face d'une seule compétence. Une idée forte considère en effet que l'administration de la recherche doit se baser sur le mérite scientifique, que l'aristocratie des experts vaut mieux que la démocratie.¹ Les techniciens des ateliers ont aussi été globalement plus exposés à des

¹ « Autre chose, je ne souhaite pas que dans les comités nationaux, on voit la dérive que l'on constate dans les universités, c'est-à-dire que les gens qui sont élus le soient simplement sur des convictions syndicales. Je souhaite que les gens qui sont élus aient un statut scientifique de haut niveau, qu'ils soient d'excellents

substances toxiques (amiante, métaux lourds, solvants) ou des rayonnements dangereux (rayons X) pouvant affecter leur santé que les chercheurs. Les maladies professionnelles restent néanmoins difficiles à quantifier en raison d'un tabou persistant. D'un autre côté, des conditions opératoires, parfois hasardeuses, ont aussi mis en danger certains thésards. Les efforts en matière de sécurité permettent d'éviter le pire, mais les conditions de travail dans certains laboratoires universitaires restent déplorables par rapport au milieu industriel (trop tatillon ?).

Même si la mobilité augmente à partir de la fin de la décennie 1960, le directeur reste tout puissant dans son laboratoire jusque vers 1980. L'une de ses prérogatives est le recrutement des étudiants. Sa renommée scientifique et l'obtention de bourses d'études sont importantes mais le rôle de l'enseignement est encore plus crucial : importance du charisme en amphithéâtre, de l'accès à l'enseignement de troisième cycle...² Collongues, Hagenmuller, Lucas, Galy, Gourier... sont présentés comme de bons voire d'excellents orateurs. Même si la majorité des futurs chercheurs sont des universitaires, ceux qui sont recrutés au sein du système des grandes écoles, sont majoritairement des ingénieurs chimistes et on ne trouve pour ainsi dire pas de normaliens (sauf Deschanvres et Boilot), de polytechniciens ou de centraliens. L'origine des thésards de chaque laboratoire dépend bien sûr des relations géographiques et institutionnelles qu'il entretient avec les divers centres de formation. Le système français a tendance à valoriser la filière des grandes écoles plutôt que l'université, surtout dans les milieux industriels.³ Le pouvoir social du directeur va de pair avec un engagement total, une dose de travail écrasante, un don de soi. Le destin d'un laboratoire peut devenir l'œuvre d'une vie. Certes, l'organisation tribale des laboratoires favorise la rigidité, et la mise en place d'une hiérarchie. Mais des espaces de liberté, d'autonomie et d'autodétermination existent à des degrés divers suivant les laboratoires et la personnalité du directeur. En réalité, on peut passer d'un laisser-faire quasi-anarchiste au Laboratoire des terres rares de Bellevue à un dirigisme autoritaire au Laboratoire de chimie du solide, à Bordeaux.

Au-dessus de la pyramide locale, on trouve une pyramide nationale sur laquelle se mesure la force des mandarins (par ordre d'ancienneté) : Chaudron, Trombe, Bénard, Michel, Hagenmuller, Collongues, Fayard, Rouxel, Livage... Au delà des caractéristiques locales, des différences d'école de recherche (chapitre IV), c'est bien au niveau collectif que la chimie du solide se construit à partir des années 1960 sur les vestiges de la chimie de l'état solide (chapitre III). La légende qui s'élabore alors dans la tradition mandarinale met en avant deux personnages hors du commun : Collongues et Hagenmuller. Orateurs fascinants, vainqueurs sociaux, visionnaires scientifiques, ils sont pensés comme les fondateurs par « interposition » de la chimie du solide. Le premier a une finesse de vue et une profondeur philosophique qui dépassent la chimie tandis que le second possède une stature qui lui permet de tout renverser frontalement pour arriver à ses fins. Plus qu'à leurs propres résultats scientifiques peut-être, ils doivent leur titre de pionniers à leur capacité de créer les conditions sociales et cognitives

syndicalistes, ce n'est pas mon problème au contraire, mais qu'ils soient d'un niveau international, sinon ils n'ont rien à y faire » [I Galy, 2006, p. 21].

² « Les collègues ne faisaient pas de cadeau ni au plan des postes ni au plan de l'enseignement. Je faisais tout mon enseignement en premier cycle, et je ne pouvais donc recruter aucun étudiant susceptible de venir en thèse. Au bout de quatre ans j'ai commencé à réagir vivement auprès de mon Directeur d'UFR pour ne plus accepter cette situation. » [I Rousset, 2006, p. 14].

³ « Nous avons longtemps collaboré avec la société le Carbone Lorraine mais j'ai toujours senti une sorte de méfiance due sans doute au fait que je ne suis pas sorti d'une "grande école". » [I Hérol, 2007, p. 7].

d'émergence de la nouvelle discipline.⁴ Avec d'autres, ils arrivent surtout au bon moment – lorsque la communauté scientifique française enfle prodigieusement à partir de la fin des années 1950, sous la république gaulliste – aux commandes de leur équipe ou laboratoire de recherche et dans les commissions (CNRS et université) où ils disposent d'un pouvoir immense.⁵ Certains s'installent au Comité national du CNRS ou au Conseil national des universités (CNU) durant plus de vingt ans et s'assurent ainsi une forte influence institutionnelle, avec parfois des abus de pouvoir.⁶ Entre 1950 et 1960, on passe d'une quinzaine à une trentaine de laboratoires liés à la chimie de l'état solide. En 1966, ils sont près de quarante unités, ce qui correspond quasiment au contingent de l'an 2000. La génération qui passe le doctorat dans la décennie d'après-guerre (Tridot, Hérold, Hagenmuller, Flahaut, Collongues, Freundlich, Prigent, Montel...) obtient rapidement la direction de laboratoires, en province pour la plupart, et rejoint les aînés, déjà en place (Michel, Trombe, Pâris, Bénard, Cueilleron, Faivre, Rohmer, Aubry...). Les années 1950 sont un moment socialement opportun pour prendre la direction d'un laboratoire parce que les effectifs vont bientôt se multiplier au cours de l'inflation des années 1960. Le directeur est alors lié, souvent de manière quasi-organique, à son laboratoire pour lequel il est prêt à donner beaucoup, une vie parfois.⁷ Jusque dans les années 1970, la plupart des échanges internes à la communauté se font entre directeurs de laboratoire ou responsables d'équipe. La soutenance de thèse en particulier offre une bonne occasion de rencontre entre lieutenants des différentes familles scientifiques. Les étudiants, les jeunes chercheurs, moins mobiles qu'aujourd'hui, peuvent tout de même exposer leurs travaux à la Société française de chimie par exemple.

L'un des soucis récurrents est le financement des recherches scientifiques. Durant l'entre-deux-guerres, de nombreux minéralistes entretenaient des relations étroites avec les industriels publics ou privés. La croissance de l'enseignement supérieur, du CNRS et des organismes publics à vocation appliquée (CEA surtout) durant l'après-guerre rend le problème des salaires moins crucial et induit une inflation du nombre de personnels scientifiques. L'effectif du CNRS triple en vingt ans (1960-1980) [Picard, 1990, p. 214]. La position professionnelle est relativement sûre : agents de l'État ou fonctionnaires de l'Éducation nationale. La sécurité de l'emploi en recherche est l'une des caractéristiques fortes de l'Université française. Elle permet de mener des projets de recherche à long terme en utilisant la relative inertie des structures, libère les responsables d'équipe d'un effort usant de

⁴ « PT : Est-ce que vous pensez que la chimie du solide a été fondée par Collongues et Hagenmuller ? JL : Oui, je le dis honnêtement. Si on devait être précis, je dirais par interposition. Ce ne sont pas eux : si on dit, est-ce que Collongues a laissé une trace au niveau international dans le domaine des matériaux ? » [I Lucas, 2005, p. 13]

⁵ La décennie (1959-1968) correspond à la croissance la plus forte du CNRS : les effectifs passent de 6176 à 14761 [Picard, 1990, p. 214]. « À l'époque de Collongues et d'Hagenmuller – retour aux années 70 –, ce sont des types qui avaient quelquefois deux, trois postes par an. Hagen s'est retrouvé en très peu de temps avec 150 bonshommes à plein temps : des postes d'ingénieurs, de techniciens... Dans l'histoire du CNRS, on est facilement juge et partie » [I Lucas, 2005, p. 12].

⁶ « Le sentiment que j'ai, entre autres, est que Hagenmuller a été un excellent facteur de la montée en puissance de la chimie du solide française parce que les laboratoires finalement devant le succès d'Hagenmuller à Bordeaux ont quand même essayé de se développer. Après, il y a eu exagération, hégémonie et je pense que ça a sclérosé d'une certaine façon les choses. Malheureusement, ma génération n'a pas rectifié le tir comme il convenait à mes yeux [...] Je n'ai jamais cherché à être dans tous les comités *ad hoc* et dieu sait qu'il y en avait. Certains ont fait leur carrière là-dessus, du fait qu'ils étaient dans les comités, qu'ils recherchaient à être dans l'environnement immédiat. Ils ne sont pas tous de mauvais scientifiques mais il y en a quand même quelques-uns qui ont finalement obtenu une influence qu'ils ne méritaient pas. Je pense qu'ils n'étaient pas misérables sur le plan scientifique mais la pérennité de leur place au sein des instances du CNRS ne se justifiait pas » [I Galy, 2006, p. 27-28].

⁷ « J'y ai consacré ma vie; je n'ai pas eu beaucoup de loisirs ; la recette c'est 60 à 70 heures par semaine. Il faut être présent sur tous les fronts l'enseignement pour avoir de bons étudiants en thèse, la recherche pour se faire reconnaître, les entreprises pour avoir des contrats. Quand vous êtes tout seul au début, c'est très difficile. » [I Rousset, 2006, p. 11].

recherche de contrats et les personnels d'un doute sur leur avenir. Ce statut enviable – au niveau de l'individu – a aussi pu favoriser une dynamique scientifique collective conduisant à l'émergence de la chimie du solide. Par la suite, la manne publique se tarissant à partir de la crise économique des années 1970, les chercheurs sont instamment priés de multiplier les contrats industriels.⁸

La recherche scientifique se structure sur le modèle jacobin (hérité des structures royales) qui induit une dualité forte entre la capitale – concentration de l'ensemble des centres décisionnels importants (CNRS, ministère, académies nationales) – et la province – qui pour la chimie accueille la majeure partie des laboratoires de recherche. Contrairement à la physique, la répartition ne se fait pas sur un axe Paris-Grenoble mais de manière plus homogène sur le territoire. À cette dualité géographique s'ajoute une compétition entre l'université et le CNRS, entre l'université et les écoles d'ingénieurs. Même si le CNRS constitue un instrument crucial de la politique scientifique, il reste toujours sous l'emprise de l'*alma mater* : les commissions CNRS, le Comité national sont dominés par les universitaires alors qu'en contrepartie le personnel CNRS peut difficilement infiltrer les instances dirigeantes de l'université.⁹ Individuellement aussi, il y a des jalousies, des oppositions, des incompréhensions. Par exemple, la carrière des enseignants-chercheurs et des chercheurs est évaluée sur la base de la seule recherche (nombre de publications, etc.). Cette situation déséquilibrée favorise les employés du CNRS qui n'ont pas d'enseignement à assurer. D'autre part, elle surprend aussi l'observateur candide qui s'étonne que la pédagogie ne soit pas prise en compte pour les enseignants de l'université. Enfin, la gestion de la recherche scientifique est une question éminemment politique. Le CNRS a été créé dans la foulée du Front populaire puis organisé à la Libération sous l'influence des communistes. Organisme relativement indépendant, il déplaît globalement à la classe politique. Plutôt "littéraire" de formation, celle-ci est en moyenne peu intéressée et peu favorable aux sciences expérimentales.¹⁰ Les

⁸ « C'est grâce à "l'inertie" du CNRS que nous avons pu développer un programme à long terme, qui nous a amenés à la découverte de la supra. Quand on vilipende les institutions françaises en disant qu'elles sont un peu statiques, il faut aussi penser qu'il y a le bon côté : ne pas avoir une obligation des résultats dans les six mois qui viennent. » [I Jérôme, 2006, p. 9]. « Je vois l'équivalent de mon poste aux États-Unis, c'est mon fils qui y est professeur : il passe le quart de son temps ou de ses nuits à rédiger des *proposals* pour ramasser du fric. – PT : *Ça vous a servi par rapport aux États-Unis ?* – JL : Oui, c'est une des raisons de l'explosion, de l'augmentation exponentielle de la chimie du solide française. » [p. 12] « le ministre de la recherche, tout à l'heure, nous parlait d'innovations et de recherches fondamentales en insistant sur le fait que pour qu'il trouve des crédits, il fallait convaincre ses collègues – de l'Éducation Nationale, de la Défense – de l'utilité de la recherche du CNRS pour la société. C'est Collongues qui m'a enseigné ça. On essayait tous les deux d'évaluer ce que coûtait la recherche, et moi j'avais oublié le coût des salaires et de la sécurité sociale, qui est absolument fabuleux. Ensuite quand j'ai travaillé aux États-Unis, où il n'y avait pas de permanents, tout le monde étant payé sur contrats, je me suis aperçu que nous étions des laboratoires incroyablement riches au CNRS. C'est Collongues qui m'avait éveillé à ça en me disant que ça ne durerait peut-être pas éternellement, la gauche. » [I Lucas, 2005, p. 11].

⁹ « Je souhaite que le CNRS continue, mais aujourd'hui, les tendances sont différentes. Les positions hostiles au CNRS sont très malheureusement dans les Universités. On veut bien de jeunes chercheurs du CNRS dans leurs laboratoires mais les cadres A sont peu prisés. Les profs d'université sont aux comités nationaux du CNRS pour juger des carrières mais au CNU, il n'y a pas de gens du CNRS, c'est un vrai problème. Dans les commissions de spécialistes, il y a plus d'universitaires. » [I Galy, 2006, p. 29]. « PT : *Comparativement, Bellevue avait du mal à recruter des étudiants, non ?* – EA : Oui parce que la faculté gardait les étudiants pour elle-même, il y avait un antagonisme, comme actuellement il y a un antagonisme entre Jussieu et l'ENSCP, le président est en bisbille avec la directrice ici. C'est dommage parce qu'il faut plus d'ouvertures partout. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 5].

¹⁰ « De manière générale, les politiques ne sont pas favorables au CNRS : la droite veut la mort du CNRS parce qu'elle croit que c'est un repère de l'ultra-gauche et que les chercheurs vivent dans une tour d'ivoire. Quand je suis entré au CNRS, je n'étais pas fonctionnaire au départ, j'étais employé par l'État. En fait, c'est Allègre qui a commencé sérieusement le démantèlement du CNRS, la droite poursuit : aujourd'hui, avec l'ANR, c'est le renforcement du système de cooptation avec tous les errements que cela entraîne. » [I Galy, 2006, p. 30]. « le Ministre François Fillon était – il l'est toujours d'ailleurs – un homme charmant, ses discours étaient ceux d'un

convictions politiques des chercheurs peuvent aussi influencer sur l'orientation des recherches. Les chimistes sont traditionnellement plus à droite en France que les physiciens et plus ouverts à la sphère industrielle, privée et publique. Hagenmuller et Collongues ont beaucoup collaboré avec l'industrie, mais ces collaborations n'exprimaient-ils pas des choix politiques ? Le premier est plutôt gaullien, le second, philosophe pragmatique, difficile à classer par rapport à un parti.¹¹ L'orientation "très à gauche" du campus de Bellevue n'est-elle pas l'une des raisons qui provoque son démantèlement par la direction du CNRS ? Caro et son équipe ne refusent-ils pas la collaboration avec les industriels pour des raisons idéologiques, d'indépendance de la recherche fondamentale ?¹²

Pour résumer, l'agrégation rapide d'un groupe en inflation autour de personnages hauts en couleur, descendants d'empires scientifiques prestigieux, forme bientôt un corps de métier autour de la synthèse et de l'étude de solides. La communauté du solide française émerge dans un environnement local fondé sur le triptyque savoir/famille/hiérarchie croisé avec un tissu national traversé de luttes claniques. Profitant des avantages multiples offerts par la recherche publique, pensée comme l'un des ressorts du rayonnement de la France, elle construit sa puissance sur une dynamique collective, en lien avec l'industrie. Sa production scientifique, massive et originale, est lue dans le texte, en français, jusque vers la fin des années 1980. À tel point que certains solidistes pensent encore à la fin de la décennie Mitterrand – comme Jean-Pierre Chevènement en 1981 – que la défense de la langue française en science est toujours possible.¹³ Au delà des frustrations induites par des situations hégémoniques et des luttes sociales violentes en interne, la communauté tient bon parce qu'elle se développe dans l'espace des sciences chimiques hexagonal et reste performante et reconnue au niveau international.¹⁴ Elle constitue une référence très forte sur la période 1960-1980, plus diffuse ensuite (1980-2000). Forte des succès des années 1960, 1970, la communauté ne cesse de croître malgré un possible déclin qualitatif. Quoiqu'il en soit, elle se pense comme l'une des meilleures du monde. Cette confiance en soi, parfois accréditée par le témoignage des acteurs étrangers, contraste avec le positionnement international des

fervent supporter de l'IUF [Institut universitaire de France], mais, pour les choses concrètes (la vie, les moyens...) il laissait plein pouvoir à son directeur de cabinet, un juriste, qui n'avait de la recherche universitaire (en sciences dures) qu'une vision très déformée et peu favorable. Les conflits furent donc nombreux entre nous ; de mon côté je croyais beaucoup à cette institution d'excellence qui valorisait l'université ; il y était de plus en plus opposé et j'ai songé bien souvent à démissionner. » [I Pouchard, 2004, p. 34].

¹¹ « Traditionnellement en France, les physiciens sont plutôt à gauche et les chimistes plutôt à droite. Quant à la couleur de ces deux écoles de chimie du solide, je dirais que Hagenmuller était un gaulliste bon teint ; il serait plutôt proche de Pasqua aujourd'hui ; Collongues, lui, était plutôt centre droite, bon vivant. » [I Boilot, 2001, p. 4]. La situation de Collongues est plus ambiguë puisque ses enfants eux-mêmes sont divisés sur la question des convictions politiques de leur père.

¹² « Il y a eu ce drame si l'on peut dire pour la chimie du solide, c'est la pression de l'industrie pour faire des choses "utiles". » [I Caro, 2005, p. 8] et Antic-Fidancev qui fut dans son équipe d'ajouter : « On n'a pas su faire de collaborations industrielles, Annick Percheron en a eu beaucoup sur les batteries mais pas nous. On ne savait pas faire. » [p. 6]. La chimie du solide est « tout ce qui va de la préparation, aux caractérisations et aux applications. C'est ce que ce laboratoire-ci fait et que Caro ne faisait pas pour les applications parce que c'était trop fondamental. » [I Antic-Fidancev, 2005, p. 8].

¹³ En 1981, Chevènement écrit que « Le français doit rester ou redevenir une des grandes langues scientifiques du monde contemporain. » « L'éditeur était toujours Gauthier-Villars à ce moment-là [1988], puis quand on est passé aux publications de langue anglaise – ce qui m'a d'ailleurs valu beaucoup de courriers de mes collègues qui me disaient que j'étais un traître à notre langue (rire) –, on commençait à être bien reconnu dans le *citation index* » [I Tournoux, 2006, p14].

¹⁴ « JL : Quelles que soient les rivalités internes nous publiions tous, nous produisions de belles choses. Je dirais que dans les années 80, 85, 90, la chimie du solide française était la première au monde » [I Lucas, 2005, p. 9].

physiciens français,¹⁵ qui pensent leur discipline comme en retard vis-à-vis des États-Unis et accepte la « nécessité de s'adapter à l'hégémonie américaine » [Pestre, 2004, p. 320]. La communauté française de la chimie du solide ne se remet pas en question. D'où une certaine inertie historique : elle n'entreprend à aucun moment une réflexion collective d'ensemble sur sa propre légitimité et ses objectifs. Sa taille et ses motivations sont-elles conformes à ce qu'elle devrait être ? L'évaluation des secteurs de recherche n'est pas vraiment très développée en France.¹⁶ L'idée n'est pas absurde cependant dans la mesure où nombreux sont ceux au sein de la communauté qui ont envie de parler de leurs conceptions personnelles pour les replacer au sein d'une réflexion plus large touchant les sciences chimiques.

VIII.1.2. Une certaine idée des sciences chimiques

VIII.1.2.1. Chimie et physique sur les bancs de l'université

Dans l'expression chimie du solide, il y a d'abord « chimie ». Effectivement les institutions rangent les solidistes parmi les chimistes : au CNRS, dans la section « chimie minérale » jusqu'en 1975, et dans le département chimie lors de sa création en 1976. Or, quand on dit chimie, l'autre, l'alter ego à qui l'on pense immédiatement est le physicien. Le positionnement du chimiste vis-à-vis de la « grande sœur » peut varier d'un extrême à l'autre : de la crainte de voir la chimie annexée par la physique au désir de vouloir fusionner les deux. Certains chimistes – comme Chrétien – ont craint que la chimie ne se dilue dans la physique. D'autres après lui ont tenu à souligner les différences, à marquer un territoire et à mettre en garde le chimiste susceptible de perdre son « âme » en frayant trop avec la physique. L'instrumentation, même si elle est acceptée en chimie contemporaine, constitue avec l'informatique et la modélisation les trois dangers potentiels menaçant l'intégrité du laboratoire de chimie, le cœur du métier.¹⁷ Les physico-chimistes ont parfois été décrits comme physiciens, voire théoriciens.¹⁸ Le mouvement qui a fait glisser les sciences vers les

¹⁵ Un physicien reconnu parle : « C'est un point intéressant pour dire que les Français ne sont pas toujours nuls ! » [I Jérôme, 2006, p. 11].

¹⁶ « Je pourrais dire des bêtises mais l'impression que j'ai en discutant avec des gens est qu'il y a encore d'excellents résultats en chimie du solide française. Mais on est loin du statut que la France avait dans les années 1970, 1980. À partir des années 1980, je pense qu'on a commencé à baisser de pied. » [I Galy, 2006, p. 27]. « Je trouve cette initiative excellente [écrire l'histoire de la chimie du solide]. À mon avis, ça nécessiterait de s'arrêter au bord du chemin pour analyser tout ça bien au-delà de votre travail. On peut même se poser – je peux être assez iconoclaste – la question : pourquoi autant de gens dans ce secteur actuellement ? L'histoire a fait que ça ne s'est jamais remis en cause, au sens de nombre de postes, il n'y a pas eu de gros à-coups. Ce n'est pas forcément l'idéal : une société, un système qui ne se regarde pas régulièrement, c'est dangereux. » [I Dexpert, 2006, p. 10].

¹⁷ « Cette terminologie précise [des défauts] trace d'autre part une démarcation claire des territoires de la chimie et de la physique : sont chimiques, les cas pour lesquels l'analyse chimique directe a mis en évidence une phase non stœchiométrique (unicité de la phase et composition chimique non stœchiométrique) ; sont physiques, ceux pour lesquels ce sont les variations de propriétés physiques qui suggèrent une variation de composition sans que celle-ci n'ait pu être établie » [Bénard, 1951, p. 295]. « constamment, le chimiste de l'état solide est sollicité de sortir de sa stricte compétence pour pénétrer dans le domaine du physicien. Mais, ce faisant, il ne doit pas perdre de vue qu'il est avant tout chimiste et que cet élargissement de ses préoccupations ne doit servir qu'à résoudre les problèmes chimiques fondamentaux, tels que celui de la nature de la liaison. » [Flahaut, 1976, p. 8]. « Le gros problème de ces outils [comme la RMN], c'est qu'ils permettent des caractérisations formidables mais risquent de faire perdre l'âme du laboratoire, centrée sur la partie chimique. » [I Tournoux, 2006, p. 16].

¹⁸ « *BBV : À quelle section du CNRS appartient le laboratoire ?* – DV : À la section 19, c'est-à-dire Chimie des Matériaux. Didier Gourier fait de la physique et même de la théorie. Ce n'est pas un mal : cela crée une synergie importante entre les gens qui s'occupent de la structure, de la cristallogénèse et ceux qui s'occupent plutôt de la

caractérisations physiques au cours du demi-siècle écoulé a touché tout l'ensemble de la chimie française mais a été constitutif en particulier de la chimie du solide. À force de vouloir se dégager de l'image d'une chimie vieillotte pour se porter vers les propriétés physiques, certains ont pu croire qu'ils avaient un pied en physique. Cependant, la référence disciplinaire reste primordiale pour la communauté.

À Grenoble, Bertaut et son groupe ont appliqué la matrice disciplinaire (structure-propriétés-applications avec des synthèses simples à haute température) sans avoir été intégrés à la communauté de chimie du solide. Or, Bertaut a été formé à l'École de chimie de Bordeaux avant-guerre et certains de ses travaux d'après-guerre ont été classés en chimie par le CNRS [CNRS, 1949b]. Par la suite, s'il est devenu un exemple pour la plupart des solidistes français, c'est parce qu'il cultivait une double compétence – physique et chimique –. Mais il reste étiqueté physicien : il ne fréquente pas la Société française de chimie, la section du CNRS qui gère sa carrière est celle de « cristallographie et minéralogie » [RA CNRS, 1969], son laboratoire de cristallographie constitue une dépendance de l'empire Néel [Pestre, 1990]. Ceci ne l'empêche pas d'avoir des contacts avec les chimistes (Pâris, Collongues, Lucas).¹⁹ Réciproquement, le physicien des solides tient à se démarquer des chimistes en répartissant clairement les rôles : belle synthèse, purification et monocristal pour le chimiste ; caractérisations pour le physicien.²⁰ Certes, il prend note des efforts des chimistes pour se rapprocher de la physique sans pour autant leur accorder le titre de physicien. Faire de la physique ne consiste pas uniquement à entreprendre des caractérisations physiques avec des instruments clés en main. Faire de la physique c'est s'intéresser aux phénomènes physiques, les découvrir, les étudier, les modéliser.²¹ En quelque sorte, si on ne naît pas physicien, on ne

théorie physique. [...] Pour mes collègues étrangers, je suis un physicien puisque je publie dans les mêmes journaux qu'eux. » [I Vivien, 2004, p. 18]. « Est-ce que vous appelez quelqu'un comme Michel Pouchard un théoricien ? Si c'est un théoricien, oui on fait appel aux théoriciens. Pour moi, il n'est pas théoricien, les théoriciens sont plutôt Antoine Villesuzanne [Bordeaux], François Weill... des gens qui passent leur temps dans les calculs électroniques. » [I Maestro, 2007, p. 11-12].

¹⁹ « Un excellent physicien français est par exemple Bertaut de Grenoble qui a été un proche de Néel : il avait une formation de chimiste initialement, puis est devenu physicien. » [I Hagenmuller, 2004, p. 9]. « nous avons engagé des coopérations avec des physiciens, le groupe de Friedel à Orsay, pour les propriétés de transport, et le groupe de Néel et de Bertaut à Grenoble, pour les propriétés magnétiques. » [I Pouchard, 2004, p. 10]. « Bertaut gardait Grenoble. Je pense qu'il y a eu un manque de chimistes du solide là-bas. Bertaut n'appartenait pas à la Société française de chimie. Il pratiquait une chimie du solide assez facile : mélange de deux composés dans un four à mouffles. Il étudiait les mêmes sujets mais pas dans la même communauté : physiciens et chimistes étaient séparés. » [I Lucas, 2005, p. 8]. « *PT : Pourquoi Bertaut n'a pas été considéré comme chimiste du solide ? – GO : Pourquoi ?* Pour être très tranché à nouveau, Bertaut était trop proche des physiciens pour être chimiste et à une certaine époque, il n'y avait pas de chimie à Grenoble. L'image qu'on a eue de Bertaut était celle d'un physicien et le laboratoire de cristallographie de Grenoble est un laboratoire de physique du solide. » [I Ouvrard, 2006, p. 7].

²⁰ « Les contacts, assez fréquents, avec la communauté de chimie du solide se présentaient comme : les chimistes du solide fabriquent un matériau et demandent aux physiciens de l'étudier, de sortir les propriétés physiques, et réciproquement les physiciens demandent aux chimistes du solide de fabriquer un matériau. C'est un peu des contacts entre fournisseurs et clients » [p. 12]. « La chimie du solide vous invente la molécule, la brique et aussi vous fait les matériaux, c'est-à-dire assemble les briques pour faire des matériaux, et vous pouvez faire des édifices totalement différents – c'est le rôle de l'architecte – avec une brique de base qui est la même. [...] Le physicien du solide aimerait avoir des monocristaux les plus purs possible, les plus gros possible sur lesquels il fait des mesures. » [I Jérôme, 2006, p. 16].

²¹ « Les grands laboratoires de chimie des solides français ont aussi acquis une compétence utile dans certaines techniques physiques. » [I Friedel, 2001, p. 4]. « Au fond les chimistes aimeraient bien faire de la physique : comme, de plus en plus, vous avez des appareils de mesure qui s'achètent clé en main, vous mettez l'échantillon et l'appareil vous fait la *manip*, les chimistes s'imaginent qu'ils pourront faire toutes les *manips*. Ok, ils vous feront des *manips* de caractérisation mais vous découvrez rarement un phénomène par cette manière-là. Vous découvrez un phénomène par la petite anomalie qui se produit dans la mesure et pour voir ça, il faut un physicien. » [I Jérôme, 2006, p. 16].

peut le devenir. La frontière physique/chimie est donc bel et bien ressentie au quotidien par les deux parties et influence les représentations des deux communautés voisines.

Les relations de voisinage posent alors trois questions : comment perçoit-on l'autre ? Comment va-t-on vers lui ? Comment, enfin, se définit-on soi-même en retour ? Le positionnement entre chimistes et physiciens n'est pas simple. La physique, plus théorique, est jugée plus noble que la chimie, cuisine de la matière. Terrible constat que celui-ci : « Les physiciens ici n'ont pas tendance à faire de la chimie mais les chimistes aimeraient bien faire de la physique. » [I Jérôme, 2006, p. 16]. Dans cette échelle de valeurs, on peut repérer des vestiges du positivisme et de la hiérarchie comtienne des sciences. Toutefois la relation physique/chimie n'est pas symétrique : alors que le solidiste moderne doit se familiariser avec la physique, le physicien des solides peut encore considérer la chimie comme un service. Le flux migratoire d'informations est plus important dans le sens physicien → chimiste que dans le sens inverse. Le chimiste fait plus souvent le voyage chez le voisin que le physicien qui peut caractériser des phénomènes physiques sans savoir de quel composé chimique il s'agit. Ce type d'erreur amuse d'ailleurs énormément le chimiste.²² Si Bertaut est parfois jugé supérieur à Néel par les chimistes, c'est bien parce que ces derniers souhaitent rappeler l'importance de leur savoir-faire dans l'étude des composés solides, souvent dénigré par les physiciens et oublié par les historiens des sciences qui emboîtent le pas des dominants.²³

Malgré ces relations dissymétriques, l'une des grandes fiertés des pionniers de la chimie du solide et de leur héritiers est d'être allé vers les physiciens. Mais il n'est pas évident de savoir qui va vers qui : Nevil Mott en son temps utilisait les résultats de l'école de recherche Chaudron, ce que n'appréciait pas toujours ce dernier. On parle toujours d'échanges personnels : Chaudron et ses élèves, Hagenmuller d'un côté ; Néel et Friedel de l'autre, Bertaut au milieu ; Trombe et ses collègues physiciens de Bellevue.²⁴ Au temps de sa splendeur (1950-1970), la *Chaudronnerie*, essentiellement composée de chimistes et de métallurgistes, a aussi formé des physiciens du métal. N'est-ce pas Lacombe qui remplace Crussard, directeur de thèse de Friedel, à la direction du laboratoire de physique du métal des Mines de Paris ? Il est difficile de savoir s'il s'agit d'un mouvement collectif. Les colloques internationaux du CNRS offrent quelques exemples ponctuels : en 1948, Darmois, Guinier, Wyart participent au congrès des « Réactions dans l'état solide » organisé par Chaudron et

²² « beaucoup de physiciens faisaient des erreurs parce qu'ils connaissaient mal l'aspect matériau. Ils ne savaient pas toujours quel produit ils étudiaient. Cela existe encore aujourd'hui. » [I Vivien, 2004, p. 18]. « les physiciens ont besoin des chimistes pour ces matériaux-là. [...] Le plus souvent, les physiciens ne se méfient pas : il y en a même un qui a fait toute une thèse sur le dysprosium à Grenoble alors qu'il avait travaillé avec du thulium, il ne s'en était pas rendu compte, l'affaire est connue. » [I Caro, 2005, p. 27].

²³ « Les physiciens ne veulent pas considérer les chimistes comme leurs égaux. » [I Vivien, 2004, p. 18]. « il faut qu'il y ait un respect mutuel. J'ai l'impression que la France souffre toujours d'avoir eu Auguste Comte, et sa classification avec tout en haut les mathématiques, puis la physique, la chimie, et les sciences biologiques... [I Jérôme, 2006, p. 13]. « Ce qu'on pourrait reprocher aux physiciens, ce serait de ne pas lire suffisamment les publications des chimistes alors que ceux-ci lisent énormément d'articles de physique (Auguste Comte n'est pas vraiment mort !). » [I Pouchard, 2004, p. 33]. « il y avait un monsieur très fort qui s'appelle Erwin Bertaut, que tous les gens de ma génération admirent, parce qu'il était à la fois chimiste et physicien. Collongues l'aimait beaucoup aussi, il avait beaucoup d'admiration pour lui parce qu'il pouvait concevoir des matériaux nouveaux et derrière il avait la physique du magnétisme. À la première thèse de mon laboratoire, celle de Jean Pannetier sur les pyrochlores, j'ai invité Collongues et Bertaut et on a discuté. [...] il était à mon sens plus fort que Néel. Néel était un grand bonhomme mais Bertaut savait faire les deux. » [I Lucas, 2005, p. 7-8].

²⁴ « Il faut bien dire que la barrière – si barrière il y a –, les frontières plutôt entre la chimie du solide et la physique du solide étaient très ténues à cette époque-là grâce à des personnalités comme Hagenmuller d'un côté, qui était me semble-t-il assez ouvert à la physique et de l'autre côté, ici Friedel très ouvert à la chimie du solide. Ça tenait plus à des personnalités – les contacts étaient des contacts personnels – qui engageaient ensuite leurs élèves. » [I Jérôme, 2006, p. 16].

Bénard à Paris. Chaque année, les « Journées d'automne de la métallurgie » associent aussi physiciens et chimistes autour des composés métalliques. Il semble néanmoins que le mouvement s'intensifie à partir des années 1960 puis surtout 1970. Dans cette perspective, deux types d'initiatives sont caractéristiques : les séminaires (réguliers au cours d'une année scolaire) et les congrès (quelques jours ciblés). Pour les séminaires, j'en ai repéré deux au cours des années 1960 : au CEA Saclay (1961-1962) sur la « Structure et topochimie des solides minéraux » (Séminaire de chimie des solides), qui réunit les agents du CEA (R. Caillat, A. Accary), des physiciens (Pierre Aigrain) et des membres de la *Chaudronnerie*. Les « Séminaires de Chimie de l'État Solide », organisés par le physicien Suchet (Bellevue), dureront dix ans (1966-1975) ; essentiellement parisiens au début, ils accueilleront par la suite des chimistes et des physiciens de la France entière. L'un des congrès très marquants pour la communauté fut celui de Bordeaux en 1964, organisé par des chimistes, qui ont invité en nombre les physiciens (20% des participants du colloque). Réciproquement, à la même époque, lorsque le tout jeune Laboratoire de physique des solides d'Orsay organise un congrès sur « La structure des solutions solides métalliques » en 1962, aucun chimiste n'est invité par Guinier, Friedel et de Gennes.

Outre ces rencontres, se mettent peu à peu en place des collaborations bilatérales entre deux laboratoires, l'un de physique (physique des solides, spectroscopie) et l'autre de chimie du solide. C'est la grande aventure multidisciplinaire des années 1960, 1970 en France qui crée un réseau de collaborations entre les laboratoires de disciplines voisines. Les deux parties y gagnent. Mais finalement savoir ce qu'est une bonne collaboration est toujours délicat : un service dans un rapport client-fournisseur, un retour constructif, une interaction suivie et quotidienne ? Les réponses diffèrent suivant les cas. Néanmoins, une bonne collaboration nécessite toujours un intérêt scientifique commun (et pas seulement un contrat alimentaire), et se traduit par des publications dans les journaux de référence des deux parties.²⁵ Il est difficile d'évaluer dans quelle mesure le savoir créé à l'interface est un savoir hybride (interdisciplinaire) ou la simple juxtaposition de deux savoirs connexes (multidisciplinaire). À partir des années 1960, le CNRS et la DGRST auront tendance à institutionnaliser ces recherches croisées en suscitant des coopérations multipartites.

Le rapprochement mutuel de deux disciplines met en lumière la multiplicité des langages de part et d'autre, ni tout à fait mêmes, ni tout à fait autres. Le manque de volonté de « compréhension » d'un groupe à l'autre est souvent attribué à l'autre justement. La démarche du rapprochement, asymétrique si l'on croit les chimistes, conduit ces derniers à se familiariser avec le langage des physiciens afin de dialoguer avec eux « d'égal à égal ». Certains tels Goodenough ou Bertaut servent de relais.²⁶ La langue apprise sur le tard ne

²⁵ « les chimistes étaient convaincus de faire une véritable collaboration avec la physique, c'est-à-dire qu'ils fabriquaient des systèmes en fonction des résultats préalables que les physiciens avaient obtenus. » [p. 9] « les cuprates, les chaînes de spins, et là, on a eu des contacts avec la communauté de chimie du solide. Les contacts étaient très bons mais je dirais que c'était plutôt des contacts de fournisseurs à clients. [...] Les contacts, assez fréquents, avec la communauté de chimie du solide se présentaient comme : les chimistes du solide fabriquent un matériau et demandent aux physiciens de l'étudier, de sortir les propriétés physiques, et réciproquement les physiciens demandent aux chimistes du solide de fabriquer un matériau. » [I Jérôme, 2006, p. 12]. « Quand je dis qu'il faut définir un problème qui intéresse les deux disciplines, il faut que, au cours du travail, – et ça c'est vraiment le point central – on puisse publier des résultats dans nos journaux respectifs » [I Moradpour, 2006, p. 2].

²⁶ « C'est un peu ce qui manque actuellement à la communauté des chimistes du solide en France, ce souhait de compréhension mutuelle que les physiciens devraient aussi accepter. » [I Jérôme, 2006, p. 13]. « John Goodenough [...] nous a appris un langage simplifié qui nous a permis de dialoguer avec les physiciens. Avant cet effort de dialogue, il faut dire que les relations n'étaient pas vraiment des rapports d'échange équilibrés dans la mesure où les physiciens demandaient unilatéralement aux chimistes de leur préparer tel ou tel cristal. Grâce à

remplace pourtant jamais la langue maternelle.²⁷ Il en résulte qu'un même référent peut garder des sens différents de part et d'autre des frontières. Cette césure communautaire est sensible à au moins trois niveaux : pour la description des individus ; dans le récit légendaire des situations historiques ; enfin par les représentations épistémologiques des objets d'étude. Il est amusant de voir la façon dont Goodenough est présenté comme « chimiste de grande valeur » par un physicien et comme « physicien de formation qui a essayé de comprendre les chimistes » par un chimiste. Un même personnage se trouve identifié selon des références différentes. Lui-même a souvent une trajectoire beaucoup plus complexe que les éléments exhibés par chacune des deux communautés, qui ne retiennent que le point fort qui l'intéresse.²⁸ Un chercheur comme Rouxel est considéré au sein de sa communauté comme un chimiste inventif qui maîtrise le langage de la physique, alors qu'il demeure pour le physicien un chimiste avec quelques rudiments de physique.²⁹

Ensuite, la lecture d'une situation historique qui touche les deux communautés peut drastiquement différer de l'une à l'autre. Pour la fameuse affaire du prix Nobel "manqué" des solidistes – les supraconducteurs à haute température synthétisés à Caen d'abord puis redécouverts par Bednorz et Müller chez IBM –, les récits sont étrangement collés à la communauté d'origine. Friedel, théoricien favorable aux collaborations avec les chimistes, insiste à ce propos sur le manque de collaboration des chimistes français avec leurs compatriotes de la physique. Un chimiste qui travaille dans son laboratoire (LPS) a la même interprétation que lui.³⁰ En revanche, deux chimistes de communautés différentes mettent en cause les théoriciens – en particulier Friedel et de Gennes pour la France –. Durant les années 1970, 1980, ceux-ci soutenaient, preuves théoriques à l'appui, que la température critique ne pourrait jamais dépasser une vingtaine de degrés Kelvin pour les composés solides métalliques ou oxydes. La théorie est un frein à leurs yeux. En France, les physiciens avaient d'ailleurs déserté le domaine des supraconducteurs à l'exception d'un groupe autour de Chakraverty, Schlenker et Rauninger à Grenoble. Stratégiquement de telles prédictions favorisaient les recherches sur les supraconducteurs « organiques » dont le Laboratoire de physique des solides était l'un des pionniers dans le monde. Souffrant de leur complexe d'infériorité, les chimistes avaient sagement cru le commandement des brillants théoriciens et

John Goodenough, nous pouvons désormais discuter avec les physiciens, pratiquement d'égal à égal, ce qui est très riche » [I Pouchard, 2004, p. 33].

²⁷ « je me suis trouvé invité à faire des conférences plénières dans des congrès de télécoms alors que c'est tout juste si, un an avant, je connaissais le b.a.-ba de la propagation d'un signal dans une fibre, on appris tout ça, ce qu'était une fibre mono-mode, je ne savais pas. » [I Lucas, 2005, p. 6].

²⁸ *HA (Hervé Arribart) : Et connaissez vous John Goodenough ?* – [...] je l'ai pas mal vu lors de ses séjours à Bordeaux puis à Oxford. Je pense que c'est un chimiste de grande valeur, qui a des idées théoriques intéressantes tout en produisant des matériaux nouveaux. » [I Friedel, 2001, p. 5]. « John Goodenough est un physicien de formation qui a essayé de comprendre les chimistes. » [I Pouchard, 2004, p. 33]. Goodenough commence par des études en mathématiques et littératures aux États-Unis avant-guerre puis soutient un Ph.D. en physique des solides (1948-1952) après avoir travaillé pour l'armée américaine. Il obtient ensuite un poste de chercheur (1952-1975) au *Lincoln Laboratory* soutenu par l'US Air Force où il travaille sur le magnétisme des solides. En 1975, il accepte une proposition d'Oxford pour devenir directeur du laboratoire de chimie inorganique (1976-1986) avant de retourner au pays à l'université d'Austin (Texas) travailler sur les piles à combustible [I Goodenough, 2001].

²⁹ Rouxel « était vraiment un chimiste exceptionnel, capable d'avoir une originalité en synthèse et qui maîtrisait les concepts de la physique » [I Hérold, 2007, p.7]. « Jean Rouxel se plaisait à dire que toute la physique qu'il a apprise et qu'il pratiquait en tant que chimiste, c'était à cause des contacts qu'il avait avec Orsay, il était très ouvert. » [I Jérôme, 2006, p. 15].

³⁰ « Les Français auraient dû découvrir les supraconducteurs cuprates si les chimistes des cuprates avaient accueilli des physiciens. C'est un beau contre-exemple de l'interdisciplinarité. » [I Friedel, 2001, p. 9]. « Vous connaissez cette histoire des supraconducteurs à haute température critique ? Raveau rate un prix Nobel parce que l'interaction avec les physiciens ne se fait pas, alors qu'il suffit de monter un étage. » [I Moradpour, 2006, p. 8].

n'avaient pas vraiment fouillé plus profondément, peu attirés par le projet de se battre pour gagner deux degrés, faisant passer la température critique de dix-huit à vingt degrés K.³¹ Ma position n'est pas celle du juge mais de l'ethnographe qui veut comprendre comment une communauté construit ses référents. Une telle divergence permet de relativiser le point de vue des acteurs. Après-coup, Friedel ne mentionne plus les prédictions des calculs théoriques, et semble les avoir oubliées. Quand deux physiciens français, Matricon (ancien collaborateur de de Gennes) et Waysand [1994] écrivent l'histoire de la supraconductivité, au chapitre 20 consacré aux oxydes supraconducteurs et intitulé la « révolution suisse », ils mentionnent à peine les travaux de Raveau alors qu'ils soulignent la démarche magistrale de Müller. Seul Denis Jérôme, héritier de Friedel, mentionne en interview la fameuse limite des 20-25K. Mais, nouvelle surprise, il considère cette limite comme une « croyance » qui venait des métallurgistes (comme Matthias) et des physiciens américains ! De manière assez magique d'ailleurs, la fameuse théorie BCS n'interdit plus après-coup à la supraconductivité des solides minéraux de dépasser 25K. Elle se contente de poser des conditions. Mais comme dit le chimiste iconoclaste : « on peut tout expliquer après-coup ».³² Cet exemple met en évidence plusieurs comportements communautaires intéressants. On a ici un cas exemplaire de rationalisation a posteriori qui conduit à reconstruire l'histoire et à rejeter la faute sur l'autre, celui qui n'est pas moi, ni nous, mais qui est loin, là-bas. N'est-ce pas plus valorisant d'appartenir à un groupe partageant de hauts faits d'arme plutôt qu'à une mêlée hésitante, ni victorieuse, ni vaincue ? Le récit scientifique écrit par le scientifique pour sa propre communauté n'a probablement pas souvent atteint le niveau d'autocritique de *Don Quichotte*. Ceci pose une autre question : existe-t-il des groupes scientifiques qui partagent une identité propre (non construite de l'extérieur) de vaincus de la science ou de l'histoire ? Cette question a-t-elle encore un sens si l'on parle de communautés humaines quelconques ?

Pour le troisième niveau de césure je prendrai un seul exemple, lié à la façon d'envisager un objet matériel, le « solide ». L'usage de ce terme familier cache des représentations divergentes entre physiciens et chimistes. Alors que le physicien s'attache avant tout au « phénomène » (nouveau) qu'il voudrait indépendant de la matière, le chimiste

³¹ « j'avais discuté un certain nombre de fois avec John Goodenough en particulier mais des physiciens comme Friedel ou de Gennes le disaient aussi, qu'on avait fait le tour de la supraconductivité, qu'on ne dépasserait guère les vingt kelvins en température critique. » [p. 4]. « À ma connaissance, en France, seul, un groupe autour de Chakraverty et Claire Schlenker et Rauninger à Grenoble s'intéressaient à la supra » [p. 5] « La physique a été totalement un frein, si on nous avait dit, c'est un challenge à relever, on serait partis et c'est sûr que nous aurions abouti que la supraconductivité à haute température aurait été découverte en France et pas ailleurs, dès les années 1975 peut être... Parce que nous avons tout pur réussi, la culture chimie du solide était à cette époque au meilleur niveau mondial en France et nous étions équipés en mesures physiques. Mais encore une fois la motivation n'y était pas. Nous sommes alors passés à des travaux qui nous paraissaient beaucoup plus difficiles » [I Pouchard, 2004b, p. 8]. « *PT : Au cours de vos recherches de chimiste, quelle a été la place des théories ?* – AM : (rires) Là, ça me fait rire ! Quand j'ai commencé les matériaux organiques conducteurs, on m'a dit – on, c'est-à-dire les physiciens – que la théorie prévoit qu'on ne peut pas dépasser 25K pour la supraconductivité. Tout le monde le sait, je crois même que de Gennes était parmi ceux qui avaient montré que ce n'était pas possible. Quelque part, c'était un moteur pour expliquer qu'il fallait prendre les organiques, où semble-t-il la théorie ne prévoyait pas la même chose. » [I Moradpour, 2006, p. 13].

³² « à cette époque-là [années 1970], des scientifiques américains, notamment Bernd Matthias, un métallurgiste réputé de la Jolla, avaient clamé de par le monde que ce serait impossible de trouver des matériaux supraconducteurs dont la température critique dépasserait 24K. Le monde semblait un peu résigné à cela. » [p. 4]. « pour la première fois, les anciennes croyances de Matthias ou des anciens métallurgistes et des physiciens, qui disaient qu'on n'allait pas dépasser 23K pour la T_C de matériaux supraconducteurs inorganiques, étaient mises en échec. » [p. 10]. « *PT : Mais finalement est-ce que la théorie BCS prévoyait que la T_C pouvait être supérieure à 23K ?* – DJ : La théorie n'interdisait pas mais elle mettait des conditions sur l'interaction entre les électrons et les phonons. » [I Jérôme, 2006, p. 5]. « Je trouve qu'ils se sont ridiculisés, c'est tout. Je ne suis pas en train de dire qu'il n'y a pas d'apports de la théorie. Dans le domaine des matériaux, les problèmes de supraconductivité, ils se sont couverts de ridicule. Après, on peut tout expliquer après-coup, c'est ce qu'ils sont en train de faire avec les supra haute T_C . » [I Moradpour, 2006, p. 13-14].

embrasse le « matériau » qu'il fabrique. À la spéculation théorique s'oppose un engouement presque charnel pour la matière du côté du chimiste ; à l'état physique défini mathématiquement répond l'élément chimique envisagé individuellement. Si l'on veut comparer terme à terme chimie du solide et physique du solide, la dualité est la même : création de l'objet et recherche des applications, d'un côté, et de l'autre côté, poser une question claire pour donner une explication aux phénomènes. Ces deux visions – spéculative et sensorielle – correspondent à deux modes de description opposés : atomique, élémentaire, locale, structurale, imagée pour le chimiste ; globale, phénoménologique, modélisée, mathématisée pour le physicien.³³ Le premier évolue dans un espace réel*, peuplé d'atomes, environnés d'électrons. Ceci reste juste même si le chimiste recourt à un puissant appareil mathématique.³⁴ Le physicien, grâce aux transformées de Fourier, pénètre et explore l'espace réciproque*, habité d'ondes électroniques fugaces soumises à des champs de force. Cette différence de point de vue est largement partagée.³⁵ Les deux visions complémentaires – physique et chimique – sont mises en évidence par les deux phrases suivantes. Prononcées la première par un physicien (expérimentateur), la seconde par un chimiste (plutôt versé en théorie), les deux phrases décrivent des situations semblables où un changement de structure modifie le comportement électronique du solide.

« sous haute pression, on change les intégrales de recouvrement des orbitales atomiques et donc on change fortement les propriétés électroniques de ces matériaux. » [I Jérôme, 2006, p. 3].

³³ Le chimiste du solide « a de fait pour culture la recherche des pistes par lesquelles arriver à des phases nouvelles sera le plus efficace, avec souvent pour guide de créer des espèces dont les applications potentielles seront les plus prometteuses. Tout ceci a fait émerger un certain nombre d'écoles spécifiques comme celles relatives à la chimie douce, aux sol-gels, etc, écoles qui explorent de larges champs en ne se refusant d'aborder aucune complexité. A l'opposé, et je simplifie fortement, l'activité du physicien se focalise plus généralement sur un type de problème issu d'un phénomène (conduction, magnétisme, etc), question qu'il essaie de poser le plus rationnellement possible, afin de formuler des interprétations qui soient par suite applicables à d'autres phénomènes pour les comprendre.. » [I Dexpert, 2006, p. 6]. « Ça m'amuse de faire pousser des cristaux et de les voir pousser, je suis relativement manuel » (chimiste) [I Moradpour, 2006, p. 3]. « Notre but est de dégager de nouveaux phénomènes qui sont indépendants des échantillons dans lesquels on les étudie. » (physicien) [I Jérôme, 2006, p. 5] « nous avons des visions complémentaires des solides : il est très important que chacun examine le problème avec son œil propre. D'une part, le physicien a une vision globale du phénomène qu'il cherche à codifier par une loi de comportement ou par une modélisation de mécanisme. Au contraire, le chimiste a une approche beaucoup plus structurale et locale, quasiment atomistique : lorsqu'il voit un changement de propriétés, il l'interprète en terme de changements d'environnement d'atomes. » [I Pouchard, 2004, p. 33].

³⁴ « les propriétés chimiques d'un élément dépendent de son environnement électronique, c'est-à-dire de ses électrons de valence. Or, la couche (4f) est profonde, en d'autres termes, la fonction d'onde qui la décrit est géographiquement proche du noyau. Les électrons (4f) sont donc des électrons internes qui n'influencent pas ou peu les propriétés chimiques. Par exemple, tous ces éléments ont tendance à donner des ions trivalents (par perte des électrons 6s² et 5d¹ externes) avec quelques exceptions tout de même (l'euporium et l'yttrium donnent des ions divalents. Une différence importante néanmoins est leur variation de rayons atomiques le long de la période : c'est la diminution du rayon atomique du cérium au lutétium qu'on appelle 'la contraction des lanthanides'. » [I Caro, 2005, p. 1].

³⁵ « PT: Would you say that the chemist thinks locally by looking at the environment of the atoms whereas the physicist thinks globally by considering the wave calculations? – AS: No, I would say it in a different way. Chemists consider the real space in crystals, but even the wave of bonding electron. They think in respect to the distances, with "a" (distance between two atoms) for example. On the contrary, physicists think in the momentum space, that is the reciprocal space. They are interested in the momentum, that is (2π/λ). In physics, electrons are free; in chemistry, environment and neighbours are more important. I would say the interesting point is just between these two points of view. » [I Simon, 2005, p. 3]. Cahn [2001, p. 46] citant Howard Reiss dit quasiment la même chose : « The first thinks in configuration space, the second in momentum space. »

Cette formulation est tout à fait typique. On dirait presque que c'est en changeant mathématiquement les « intégrales » que les « électrons » vont se mettre au pas pour suivre la « loi » alors que la démarche est inverse, la loi étant déduite du comportement des électrons. Un chimiste n'aurait prononcé une telle phrase que sous la torture ! Pouchard quant à lui décrit ainsi la « règle du tailleur » qu'il a énoncée de manière informelle au début des années 1970 (puis qui a été reprise par d'autres chimistes sans mentionner l'antériorité du « Bordelais ») :

«La règle du tailleur [...] consiste à dire que si un degré d'oxydation n'est pas stable, pour le stabiliser, il faut lui tailler un habit sur mesure, c'est-à-dire lui créer un site, un environnement atomique sur mesure dont la dimension et surtout la symétrie soient en accord avec sa propre structure électronique. Il faut que les n électrons externes de l'ion de transition (d^n) soient stabilisés au maximum par « l'habit » qu'on va lui tailler sur mesure (c'est-à-dire que le polyèdre de coordination conduise à un éclatement des orbitales atomiques qui permettent de stabiliser au mieux les n électrons) . » [I Pouchard, 2004, p. 15].

On note le réalisme de la description du chimiste et la richesse des images utilisées : le tailleur et l'habit sur mesure, l'élément avec son degré d'oxydation, la structure (le polyèdre de coordination), la théorie physique (orbitales atomiques). Le contraste est d'autant plus saisissant que les deux personnages – Jérôme et Pouchard – ont vécu proches de la communauté voisine et n'ont cessé durant quarante ans de nouer des collaborations multidisciplinaires. Cet écart linguistique suggère un abîme conceptuel entre ces deux communautés qui se consacrent aux mêmes objets : les solides. On ne fait pas impunément carrière dans le monde des physiciens ou dans celui des chimistes : l'autre aura souvent des problèmes de traduction pour vous comprendre, et, quoi qu'il arrive, il ne parlera jamais vraiment comme vous. La collaboration multidisciplinaire associe deux visions complémentaires sans vraiment promouvoir une vision interstitielle.

VIII.1.2.2. Au sein des sciences chimiques : d'une identité commune à des altérités profondes

Le découpage universitaire aidant, les solidistes se démarquent d'abord des physiciens, qui le leur rendent bien. Ce faisant, ils affirment leur identité chimique. En quoi consiste-t-elle ? La principale convergence touche à la synthèse, c'est-à-dire la fabrication matérielle d'un composé chimique. Le chimiste crée son objet d'étude.³⁶ Si un chimiste n'a plus les moyens de faire de belles synthèses, il le déplore et essaie de trouver un nouveau laboratoire

³⁶ « pour moi, la chimie, en général, et donc celle du solide, se doit d'abord de créer l'objet de son étude. » [I Dexpert, 2006, p. 6].

qui lui en donnera les moyens.³⁷ Sans synthèse, le chimiste ne fait plus son « métier » ; il abjure en quelque sorte sa profession de foi, qui est de créer des matériaux neufs. Malgré les exhortations de ceux qui, comme Hagenmuller, militent en faveur des propriétés physiques, le savoir-faire du solidiste reste la fabrication de nouveaux solides. Non pas une « modélisation » de la synthèse mais sa réalisation pratique en four ou en éprouvette. Du reste, c'est ce que les physiciens ont bien compris en s'associant avec les chimistes. La connaissance de la matière et de ses transformations, voilà ce qu'ils demandent aux chimistes.³⁸ Sans « matériau », le chimiste a du mal à être original. Souvent il cherche à faire mieux ou plus vite que les autres. L'aspect innovant est ici fondamental. Son but n'est pas l'application d'une méthode mais l'originalité. Une fois seulement qu'il a fabriqué une matrice neuve, qu'il travaille sur des solides que lui seul maîtrise, il peut appliquer les méthodes classiques de caractérisation.³⁹ Parfois, comme pour le Laboratoire des terres rares, les chimistes sont aussi originaux dans la maîtrise des caractérisations. Au contraire, si le physicien expérimental travaille sur le même solide que beaucoup de ses collègues, il doit être capable de développer une méthode ingénieuse (instruments différents ou intuition d'un résultat à mesurer) afin de mettre en évidence ce que recèle la matière et que les autres n'ont pas vu.⁴⁰

Même si c'est la matière qui prime en chimie, le fonctionnement de la communauté est régi par l'échange d'informations, qu'elles soient écrites – comme les publications – ou orales – par les communications –. L'échange est d'abord linguistique : le composé solide reste dans les laboratoires. Parfois il circule d'un laboratoire de chimie à un centre de caractérisation (physique, spectroscopie...). Mais le plus souvent les solides ne voyagent pas et seul le récit de leur fabrication traverse l'espace. Pour décrire ce genre de situation, Latour [1985] a parlé de « mobiles immuables ». C'est la croyance en la reproductibilité qui assure la cohésion d'une communauté de sciences expérimentales : un chimiste universitaire continue d'appartenir au groupe uniquement si ce qu'il affirme textuellement d'autres parviennent à le reproduire matériellement, si l'annonce d'un composé nouveau est confirmé par sa fabrication ailleurs.⁴¹

³⁷ « Au CNRS (et à l'université) les chimistes du solide ne font presque plus de synthèse, ils ne font plus vraiment leur premier métier. Ils font le travail des physiciens qui eux repassent après pour "améliorer" les modélisations des chimistes. » [I Colomban, 2003, p. 2].

³⁸ « aujourd'hui il n'y a plus beaucoup de synthèses qui se font sans simulation. » [I Lefrant, 2006, p. 12]. « les chimistes [...] fabriquaient des systèmes [...]. Bechgaard est un chimiste qui comprend les propriétés physiques alors que nous, malheureusement, nous ne comprenions pas les subtilités de cette chimie organique. C'est une chimie organique non triviale parce qu'il s'agit de manipuler des produits assez dangereux comme le CSe₂, le diséléniure de carbone, ce n'était pas une chimie accessible pour des physiciens. La collaboration était absolument nécessaire et chacun y amenait le meilleur de son domaine. » [I Jérôme, 2006, p. 9].

³⁹ « en chimie, on est plus jaloux d'originalité, ça c'est une grosse différence. » [I Moradpour, 2006, p. 5]. « C'est le matériau qui est intéressant. C'est le message le plus important. Toutes les avancées qu'on a eues au laboratoire Collongues, c'est parce qu'on a su faire de la synthèse de matériaux avant et mieux que les autres. Notre premier travail est de faire de l'innovation en matériaux, mais on a beaucoup de collaboration en physique. » [I Boilot, 2000, p. 3]. « D'abord il faut faire des synthèses originales de nouveaux produits et ensuite seulement on peut faire tout plein de mesures physiques mais sur nos propres matrices. » [I Lucas, 2006, p. 19].

⁴⁰ « J'ai vu des congrès sur les métaux organiques, il y avait quatre cents physiciens et deux cents avaient fait la même mesure, sur le même matériau. Quand on pose la question, ils disent qu'elle n'est pas faite de la même façon, chacun persuadé de faire la mesure mieux que les autres (rire). » [I Moradpour, 2006, p. 4].

⁴¹ « comment on sait que les solides sont là ? Il faut être clair : la science n'existe que par les publications ; les solides et les manip, personne ne les voit ! Il faut que tout ce qu'on fait soit par définition reproductible, c'est-à-dire reproduit par n'importe qui, n'importe où. Ceci étant, il y a des tours de main et des savoir-faire qu'on ne trouve pas du premier coup mais si on insiste beaucoup, on doit y arriver. Sinon, il y a un problème. » [p. 12]. « la science n'existe que par les publications. Où sont les faits ? je ne sais pas mais les manip et les échantillons ne sont pas dans les publications. » [I Moradpour, 2006, p. 17].

Le chimiste développe une affinité avec la paillasse. Des professeurs émérites y retournent même en fin de carrière : Hérold, Collongues, Galy... La fascination pour le solide original est première, l'engouement pour les propriétés physiques ne vient qu'après. Il est pourtant facile d'inverser l'ordre des intérêts : propriétés physiques d'abord, synthèse ensuite. C'est ce que certains solidistes ont été tentés de faire à l'apogée de la chimie du solide durant les années 1970. La chimie des solides, par la multiplication des composés originaux qu'elle a rendue possible, a montré qu'un tel renversement des valeurs n'était pas viable pour la communauté. Car il s'agit bien de valeurs ici : la synthèse et la liaison chimique sont primordiales pour le chimiste. Le reste, il le laisse aux autres, aux physiciens.⁴² Peu importe – enfin presque ! – que les « *cuprates* » de Caen n'aient pas révélé leurs propriétés supraconductrices en Normandie mais en Suisse, ils n'en demeurent pas moins de superbes solides pour les chimistes du point de vue de l'originalité.⁴³ Quand je dis solide, entendez un objet que l'on peut regarder, toucher, admirer dans ses formes, ses textures, ses couleurs ou sa taille, un objet esthétique. Et en effet, parfois, la synthèse chimique est semblable à une création artistique. Si l'œuvre d'art aboutie résulte de dizaines voire centaines de brouillons, le solide qui fait du bruit nécessite des dizaines d'erreurs, d'impasses, de mauvaises idées.⁴⁴ Le chimiste cultive un ego artistique.

Voilà pour ce qui constitue, à mes yeux, l'identité d'une discipline construite sur le désir de fabriquer des objets matériels originaux. Définition pour soi qui se double d'une définition par rapport à l'autre, la physique, ce miroir disciplinaire incontournable : matière contre phénomène. Certes la chimie physique par exemple, a montré que la chimie n'était pas seulement fabrication matérielle mais aussi « problème ». Cette conception a été adoptée par la chimie minérale mais aussi, plus largement, par l'ensemble de la communauté universitaire à travers les recherches coopératives sur programme (III.4.2.3). Si la chimie a forgé son identité sur une opposition forte à la physique, elle n'est pourtant pas unifiée en son sein. L'emploi du singulier est trompeur : n'y a-t-il pas plusieurs sciences chimiques ?⁴⁵ Si on descend un cran plus bas dans l'analyse, la chimie du solide apparaît comme une sous-discipline parmi d'autres. La chimie n'est pas vraiment une entité homogène puisqu'elle distingue plusieurs subdivisions qui ont contribué au « démembrement d'un territoire » [Bensaude & Stengers, 1992, partie V]. Par un découpage en sous-disciplines, l'organisation

⁴² « Le schéma relationnel propriété-structure a permis de bâtir des modèles prédictifs souvent vérifiés par l'expérience. Il avait, par contre, l'inconvénient de faire dévier le chimiste de ce qui est au cœur de son métier : d'une part nourrir les méthodes de synthèse, et d'autre part approfondir la connaissance de la liaison chimique. » [Rouxel, 1997, p. 1]. « ça devien[t] ringard de faire de la chimie, [...] les gens veulent avoir des courbes, [...] pensent que la mesure physique est plus glorieuse. Je l'ai dit souvent : je suis venu à au moins 10 thèses de vos collègues sortis de l'École de chimie, des mecs bons, et pourtant, je ne reviendrai plus à leurs thèses si je vois 1^{er} chapitre, structure Mössbauer, 2^e chapitre, structure EXAFS... Ils sont contents, ils sortent une thèse de 500 pages mais il n'y a rien d'original. Je leur dis que ce sont de bons techniciens qui appliquent une méthode. » [I Lucas, 2006, p. 19].

⁴³ « Le point culminant de cette synthèse chimique triomphante s'est produit non pas à Paris ni à Rennes ni à Bordeaux mais à Caen avec les cuprates de Bernard Raveau, qui ont mené à la découverte des supraconducteurs à haute température critique. C'était de la pure chimie de synthèse. » [I Lucas, 2005, p. 3-4].

⁴⁴ « des lingots [de verre] de 20kg. – PT : C'est très impressionnant comme taille ! – JL : Oui je me souviens que Collongues me disait : "tu me bluffes là !" Il aimait bien ces chimies appliquées des procédés, avoir des petites poudres. Lui, sur la fin de sa vie, – ce qui est quand même incroyable ! – il avait demandé à faire des monocristaux lui-même, de la cristallogenèse. Il venait me montrer ses cristaux, il avait 67, 68 ans. » [p. 11]. « Pour moi, le chimiste est comme le peintre face à sa toile, on a des idées qui sont vraies ou fausses : je dis toujours qu'il faut avoir beaucoup d'idées mais 9/10^e de ces idées sont mauvaises mais ce n'est pas grave, sinon on ne trouve pas de choses nouvelles. » [I Lucas, 2005, p. 19].

⁴⁵ « Il ne faut pas oublier qu'on dit "chimie" mais que la chimie est aussi très hétérogène. » [I Moradpour, 2007, p. 16]. La tendance actuelle, en renommant le département chimie du CNRS en sciences chimiques, favorise le choix de la pluralité de la chimie plutôt que sa singularité.

institutionnelle (université et CNRS) met en évidence l'hétérogénéité du territoire. À l'université, les divisions administratives distinguent les disciplines physique et chimie, et rassemble les diverses sous-disciplines de la chimie au sein d'une unité d'enseignement commune. À partir de 1976, la direction du CNRS décide d'un découpage triangulaire pour les sciences expérimentales liées aux matériaux : physique (et mathématique), sciences pour l'ingénieur et chimie. Le département « chimie », qui changera d'intitulé par la suite pour devenir pluriel – « les sciences chimiques » –, englobe plusieurs sections. De quatre – chimie physique, minérale, organique, biologique (1946-1967) – on passe à sept (1967-1975) puis six (1975-1983) puis cinq (1983-1991) avant de revenir à six après 1991.⁴⁶ Les réorganisations sont si fréquentes qu'en quarante ans de carrière, un chercheur ne prend pas acte de toutes les modifications. L'appartenance à telle ou telle section est d'autant moins importante que souvent une section ne correspond pas à une communauté scientifique unique : soit une petite communauté – radiochimie, chimie du solide organique – est incluse dans une section plus vaste, soit une large communauté – chimie moléculaire ou physico-chimie –, déborde et s'étale sur plusieurs sections.⁴⁷ La chimie du solide, quant à elle, est incluse dans une section plus grande – chimie minérale puis chimie des matériaux solides –, mais elle en constitue la principale communauté à partir des années 1960.

Si les sections ne constituent pas toujours un cadre communautaire pertinent, en revanche, chaque solidiste se définit dans son rapport aux autres sous-disciplines. La formation scolaire, qu'elle soit secondaire ou universitaire, constitue une étape cruciale dans ce processus de différenciation. Elle agit de manière très forte au niveau personnel parce que c'est le moment où l'étudiant rencontre, par des enseignements variés, l'éventail des domaines de la chimie. Au cours de ses études, il fait le choix crucial d'un champ scientifique pour sa thèse, crucial parce que ce choix va le conditionner fortement pour l'ensemble de sa carrière universitaire (il est plus difficile de se réorienter après la thèse). L'étudiant chevronné aura tendance à choisir un domaine avec lequel il a le plus d'affinités même si certains font des choix par « défaut » (par rapport aux résultats scolaires par exemple). En moyenne, les étudiants actuels, c'est-à-dire les chercheurs potentiels, choisissent donc un domaine qui leur plaît le plus et, par la même occasion, refusent ceux qui leur plaisent moins, où ils ne sont pas à l'aise ou n'ont pas eu de bons résultats en licence.⁴⁸ Or, le syndrome des mauvaises notes peut tout à fait provoquer une aversion pour une matière scolaire honnie pour le reste de la

⁴⁶ Les modifications de 1967 induisent le dédoublement de la chimie physique en physico-chimie atomique et moléculaire, le re-découpage des chimies organique et biologique en trois sections : « organique », « organique biologique », « biochimie » et l'introduction de la thermodynamique et cinétique (section 5). Celles de 1975 écartent la section 5 et opèrent quelques changements de noms. Le découpage des années 1980 correspond aux cinq sections suivantes : « chimie des coordinations et catalyse » (section 12) ; « électrochimie, cinétique et photochimie » ; « chimie et physico-chimie des matériaux inorganiques » ; « chimie et physico-chimie d'intérêt biologique et thérapeutique » ; « physico-chimie moléculaire et macromoléculaires » [Lanciano-Morandat, 1999, p. 144].

⁴⁷ « Même au CNRS, il n'y a pas de section spécialisée en chimie du solide organique, on est obligé de se rattacher à des sections plus vastes, où on est alors un peu noyé. C'est un problème mais je pense que beaucoup de gens vous diront ça, il n'y a pas de section du CNRS homogène, en chimie en tout cas. » [I Moradpour, 2006, p. 7].

⁴⁸ « PT : Vous pensez donc qu'il y a un gros impact de la formation initiale sur la vie du chercheur ? – AM : Oui, un gros impact dans la mesure où sa formation initiale est un choix qu'il a fait, on ne lui a pas imposé ce choix, qui résulte de ses goûts personnels. On ne change pas forcément de goûts après. J'enfonce des portes ouvertes. – PT : Vous avez clairement choisi la chimie organique ? – AM : Oui, c'est par goût ! » [I Moradpour, 2006, p. 16]. « pourquoi la chimie ? Je ne devrais peut-être pas le dire mais c'est un peu par défaut : si j'avais été suffisamment bon en math, j'aurais fait des math, de la physique. Je n'étais quand même pas trop mauvais (rires). Voilà comment je suis arrivé à la chimie mais ça me plaisait quand même ! » [I Adam, 2006, p. 1]. « En chimie organique, il y avait le professeur Calas, qui était aussi doyen de l'université, mais j'ai peiné en chimie organique sauf sur les problèmes de délocalisation électronique sur les cycles parce que c'était plus physique alors que le reste était plus un effort de mémoire. » [I Galy, 2006, p. 1].

carrière. Il y a donc dès les bancs de l'université une sélection disciplinaire forte dans le choix de tel ou tel domaine. Ce positionnement scolaire est exacerbé par la suite puisque dans les commissions administratives on se retrouve face à ces mêmes disciplines que l'on a refusées étant étudiant. Or, c'est justement le moment où il faut lutter pour exister : avoir plus de postes, plus de crédits, plus d'étudiants...

La chimie moléculaire (organique et de coordination) a souvent été perçue par les solidistes comme une discipline dominante qui, laissant peu de place aux autres, avait tendance à oublier ce qu'elle leur devait. Par conséquent, en première approximation, la chimie du solide peut se définir en creux, comme ce qui n'est ni moléculaire, ni de la matière molle (mousses, tissus biologiques). En période de pénurie d'étudiants en sciences expérimentales – comme c'est le cas actuellement –, la chimie moléculaire constitue encore une menace parce qu'elle attire un plus grand nombre d'étudiants.⁴⁹ Réciproquement, quand on interroge un organicien de formation sur Collongues ou Hagenmuller, il répond : « tous ces gens-là, je connais leur nom mais je n'ai jamais interagi avec eux, ce sont des inorganiciens. » [I Moradpour, 2006, p. 16].

Assez étonnamment, contrairement à la chimie organique, la chimie physique n'est jamais considérée comme une menace sociale par les solidistes. Pourtant elle constitue la plus grande communauté de chimistes au cours des années 1960 avec près de 30% des effectifs CNRS de la chimie (III.3.2.3). Deux facteurs jouent dans le même sens : relative stabilité en nombre – alors que l'organique croît plus vite que le minéral – ; plus grande proximité cognitive puisque les physico-chimistes jouent un rôle de vecteur dans la phase instrumentale des années 1960, 1970 (chapitre IV, VI.2.1). Pour un minéraliste, la physico-chimie est pourvue de l'aura conférée à la physique. La continuité universitaire – des amphithéâtres aux commissions – fait que chaque groupe se conçoit dans un rapport plus ou moins conflictuel aux autres groupes. Elle implique simultanément une conception individuelle (vis-à-vis de la scolarité puis de la carrière) et un comportement collectif (réflexes de défense vis-à-vis de quelques communautés désignées).

Plus intéressant encore, la spécialisation sous-disciplinaire modèle le langage utilisé ainsi que la manière de raisonner, la façon de concevoir la matière. Pour ce qui est du langage, prenons deux exemples. À Bordeaux, à la fin des années 1960, Pouchard oriente un jeune chercheur, Gérard Demazeau, vers l'étude des solides à « hauts degrés d'oxydation ». Il reprend des travaux allemands des années 1950 (Scholder et Klemm) avec des techniques haute pression performantes mises en place au LCS par Maurice Rault. Ces composés sont alors appelés oxydes à « valences anormales » [Klemm, 1956] ou encore à valences « peu usuelles » [I Pouchard, 2004, p. 14]. Ces valences n'ont rien d'anormales : elles sont juste différentes (plus élevées ou plus basses) des valences que l'on rencontre traditionnellement

⁴⁹ « PT : *Quelles sont les disciplines dominantes à l'époque ?* – MT : Chimie organique et chimie de coordination, chimie moléculaire disons. – PT : *Et la biochimie alors ?* – MT : Ce n'était pas encore émergent comme ça l'est devenu. » [I Tournoux, 2006, p.9]. « Ils sont très nombreux en moléculaire, où l'on peut multiplier les composés mais en chimie du solide, c'est quand même plus difficile, qu'on le veuille ou non. Alors bon j'exagère ! Mais j'ai le sentiment que sorti de la chimie moléculaire point de salut » [I Galy, 2006, p. 19]. « PT : *Qu'est-ce que vous entendez par chimie du solide ?* – JA : C'est la chimie non moléculaire, qui permet d'aller plus facilement peut-être vers des matériaux de haute technologie, avec une notion de durabilité. Dans le domaine des télécoms par exemple, il faut éviter tout ce qui est colle (époxy) parce que ce sont des composés qui vieillissent mal. Elle s'oppose à tout ce qui est chimie de la matière molle, chimie des plastiques » [p. 8]. « jusqu'à maintenant, on a eu pas mal d'étudiants qui prenaient chimie du solide mais la tendance, comme un peu partout, fait que les étudiants vont plus vers la chimie moléculaire, sans parler de la baisse des effectifs en sciences de manière générale. On est passé de promotions de 40 à 60 étudiants en DEA chimie du solide dans les années 90-95, à quelques étudiants qui ont pris l'option matériaux en *master* M₁ cette année. » [I Adam, 2006, p. 5].

dans les complexes en solution. L'étude des solides minéraux étant moins valorisée (ou plus récente) que la chimie minérale en solution, le langage se positionne par rapport à celle-ci. Le deuxième exemple touche à une habitude qu'ont contractée les organiciens d'appeler les composés nouveaux suivant le nom du ou des chimistes ayant mené la synthèse. Dans le cas des solides organiques, on trouve par exemple les « sels de Bechgaard », du nom du chimiste Klaus Bechgaard qui a synthétisé ces complexes de transfert de charge dont les propriétés supraconductrices ont été mises en évidence par le groupe dirigé par Jérôme au LPS (Orsay).⁵⁰ En chimie du solide, de telles pratiques sont extrêmement rares : les solides sont désignés d'après leur composition chimique élémentaire. Pour les compositions complexes, on garde les sigles : bronzes de vanadium, alumine bêta, Nasicon, Y-Ba-Cu-O (lire "i.ba.cu.o"), ZBLAN, LMA, TeX... La seule exception que j'ai trouvée correspond aux « phases de Chevrel », famille de sulfures métalliques supraconductrices popularisés (par les Américains) sous cette appellation (VII.1.1). Les physiciens ont tendance à négliger la composition chimique en opérant des raccourcis de sigles.⁵¹ Au sein des communautés sous-disciplinaires les us et coutumes langagiers sont donc différents même si, souvent, on a recours à un corpus commun.

Les différences de langage paraissent anecdotiques en regard de la divergence de raisonnement face à la matière. Prenons l'exemple des "ennemis" irréconciliables : minéralistes et organiciens. Quel saut matériel entre le « solide » et la « molécule » ! Premièrement, les tailles des objets sont incommensurables pour l'entendement humain : de quelques-uns à quelques centaines d'atomes dans une molécule contre le nombre d'Avogadro, soit 6.10^{24} atomes, dans un gramme de solide. Dans un cas, il s'agit d'un enchaînement quasi-infini d'atomes (volume infini), dans l'autre d'un composé localisé sur quelques angströms (volume restreint). À cette rupture macroscopique/atomique correspond un grand écart conceptuel. Pour les solides cristallins, la brique de base n'est pas la molécule mais la maille élémentaire qui, répétée à l'infini, permet de décrire l'ensemble de la matrice matérielle. Elle nécessite une vision à trois dimensions qui dépend des capacités personnelles mais aussi d'un entraînement lent et laborieux. Il n'est pas facile de l'acquérir quand on n'a pas grandi dedans !⁵² En revanche, organiciens et solidistes convergent sur la relation structure-propriétés, qui est au cœur de la chimie organique depuis le dix-neuvième siècle alors qu'elle n'intervient pour le solide qu'à partir des années 1930. Pour les solidistes, la cristallographie est devenu l'outil de base parce qu'elle décrit la structure atomique tridimensionnelle qui porte l'ensemble des propriétés physiques. La symétrie de la maille constitue ainsi l'élément crucial de l'analyse structurale. Pour Caro, versé en chimie mathématique, le passage de la structure (3D) aux propriétés mesurées (3D) s'opère via un espace à « six dimensions » (6D).

⁵⁰ « Bechgaard a laissé son nom sur les sels de Bechgaard dont les propriétés physiques sont intéressantes » [I Jérôme, 2006, p. 13].

⁵¹ Les physiciens « ont tendance à mépriser un peu la chimie qu'il y a derrière. Ça se traduit par le fait que les matériaux ont des sigles qu'on raccourcit : par exemple, les aiguilles que je vous ai montrées sont du TMTSF, on raccourcit en TM et on oublie ce qu'il y a dedans. C'est quelque chose de déplaisant pour le chimiste. » [I Moradpour, 2006, p. 5].

⁵² « Le chimiste du solide s'intéresse à des objets présentant un nombre infini d'atomes. C'est d'ailleurs ce qui le distingue du chimiste moléculaire. » [Rouxel, 1998, p. 5]. « les approches sont différentes, les techniques sont différentes » [p. 19]. « un métal n'est plus une molécule, il y a une grosse différence entre une molécule d'eau et le fer par exemple. Quand j'entends certains parler de molécules dans les alliages, c'est d'une stupidité confondante. » [p. 22] « La chimie du solide est un assemblage d'atomes qui ne peut se percevoir et qui doit se percevoir à trois dimensions, de façon infinie. Une molécule a trois dimensions mais elle est limitée, les chimies moléculaire et organo-métallique sont des chimies qui ont un volume limité, hors les polymères. La chimie du solide a un volume illimité, quand on regarde la taille d'une maille par rapport à un monocristal, on passe de un à quelques millions. – PT : *Le passage de la vision de la chimie du solide à la chimie de coordination se fait sans problème ?* – JG : Oui, dans ce sens-là, c'est plus facile que d'acquérir la vision d'une maille d'un composé inorganique quand on est habitué aux molécules. » [I Galy, 2006, p. 20-21].

Le passage par ce monde contre-intuitif dépasse l'entendement humain, habitué à vivre dans un monde tridimensionnel, et n'est palpable qu'au travers d'équations mathématiques.⁵³ Sur le point de la relation structure-propriétés, le passage de la molécule au solide pourrait donc aussi induire une rupture épistémologique que la similitude des termes masque. Que ce soit en chimie de l'état solide (années 1950), chimie du solide (1960-1980) ou chimie des solides (1980-2000), la relation structure-propriétés quel que soit le sens qu'on lui donne a structuré les diverses communautés étudiants les solides minéraux.

Qu'en est-il des organiciens fabriquant des solides organiques ? Sont-ils plus proches de la chimie moléculaire ou de la chimie du solide (minéral) ? Tout au long de la période 1970-2000, leur petite communauté – Alec Moradpour récuse d'ailleurs le terme – reste distincte de la chimie du solide et se rattache à des commissions de chimie moléculaire. Les problèmes, les méthodes de synthèse, les caractérisations sont distinctes. La diffraction des rayons X constitue un outil tout à fait annexe pour les organiciens du solide. Même s'il fabrique un solide composé de 6.10^{24} molécules organiques, Moradpour reste attaché à la molécule comme cellule de base. La base de son travail de chimiste touche la chimie organique (solvants, évaporateur rotatif...), qui correspond à sa formation universitaire. Contrairement au solidiste, il ne conçoit pas le solide dans sa structure tridimensionnelle et raisonne « *moléculairement* ». ⁵⁴ D'ailleurs, il pense que la relation structure-propriétés n'est

⁵³ « Le chimiste du solide se voit avec le sens de l'organisation structurale qui gère toutes les propriétés physiques quelles qu'elles soient. Ensuite on peut enseigner la structure en relation avec les propriétés physiques. [...] tout cela se voit avec la même vision, c'est une vision tridimensionnelle. » [I Galy, 2006, p. 20]. « je me suis rendu compte d'une chose que le monde de la chimie du solide n'a toujours pas compris : que c'était très complexe en fait, que l'origine de la propriété, contrairement à ce que pensent beaucoup de chimistes, n'est pas simple. C'est en fait si compliqué qu'il n'est pas possible de décrire la propriété en terme de cristallographie. Les chimistes du solide adorent la cristallographie et la relation structure-propriétés, malheureusement pour un certain nombre de propriétés, cette relation structure-propriétés n'est pas simple du tout. J'ai beaucoup expliqué qu'elle passait par une espèce de monde intermédiaire à plusieurs dimensions, qui est commandé par la symétrie aussi, et que c'est dans ce monde multidimensionnel que se forme la propriété et pas dans le monde tridimensionnel du cristal. C'est assez difficile à comprendre parce que c'est contre-intuitif. On a l'impression que si on appuie sur tel axe c, on va provoquer telle modification de la propriété, eh bien ce n'est pas vrai du tout ! En fait, si c'est une affaire à symétrie ternaire, on est dans un monde à six dimensions, et il faut voir ce qui se passe dans le monde à 6 dimensions. La relation n'est pas simple et j'ai l'impression que les études sont un peu en panne parce qu'on n'a pas réalisé tout ce que cette idée pouvait apporter. – PT : *C'était plus vrai pour les terres rares ou avec tous les éléments ?* – PC : C'était vrai avec beaucoup d'éléments, j'ai un peu étudié dans ce cadre les éléments d, je reste persuadé que beaucoup de phénomènes que mes collègues ont étudiés comme le ferromagnétisme, c'est bêtement du paramagnétisme déguisé. Je n'en ai pas la preuve, c'est juste une impression que j'ai eu sur certains matériaux. Il y a eu un moment où la complexité de l'outil a dépassé la capacité d'entendement parce que c'est un énorme appareil mathématique, difficile à saisir, qui mène à cette situation contre-intuitive dans laquelle le sens physique du matériau est perdu. Ce sont des études très fondamentales. » [I Caro, 2005, p. 7].

⁵⁴ « PT : Vous étiez dans les mêmes sections que les minéralistes ou pas du tout ? – AM : Non, pas du tout, c'était toujours des sections de chimie organique. Qu'est-ce que j'irais faire chez les inorganiciens ? Ils ne comprendraient pas ce que je fais et inversement. [...] – PT : *Ce qui m'a frappé assez rapidement, c'est que les chimies du solide organique et inorganique étaient deux univers complètement différents.* – AM : Oui, c'est complètement différent, ça n'a rien à voir ! Il n'y a aucun lien, l'organique et l'inorganique ont deux façons de raisonner différentes, il n'y a aucune raison pour que ce qui en sort ait des problématiques analogues. – PT : *Justement, quelles sont les différences entre minéralistes et organiciens du solide ?* – AM : Un organicien, normalement raisonne sur le plan moléculaire, pour construire quelque chose d'organique, de moléculaire. Les organiciens, même du solide, sont des gens de la molécule, ils sont plus loin du solide. Les inorganiciens ont eux une vision plus globale, plus proche du solide, que je n'ai pas, moi. J'ai vraiment du mal à raisonner en terme de structures comme ils font. Ils sont plus près des physiciens, ils se comprennent mieux sur l'état solide. » [p. 8]. « PT : *Vous restez plutôt du côté de la molécule ?* – AM : Oui, j'ai tendance à raisonner *moléculairement*. Mais c'est normal : quand on a une formation dans une direction donnée, c'est très difficile ensuite de s'en sortir. » [I Moradpour, 2006, p. 17].

pas du tout établie pour les solides organiques.⁵⁵ Une telle conception se situe donc à l'opposé de celle des solidistes. Si on devait placer ces deux types de solide sur le territoire de la chimie, la chimie du solide organique serait plus chimique, plus proche du cœur, tandis que la chimie du solide (minéral) serait à la frontière avec la physique.

Une telle rupture épistémologique et sociale pose la question des matériaux « hybrides », qui sont composés à la fois d'organique et de minéral ? Je n'aurai pas de réponse claire à proposer. Il semble néanmoins que suivant le matériau hybride auquel on pense, on l'envisage tantôt comme une extension de la chimie moléculaire et tantôt comme une innovation de la chimie douce. Certains laboratoires, comme celui de Patrick Batail à Angers, se trouvent en position interstitielle vis-à-vis des deux communautés.⁵⁶ La tendance est sans doute très récente, et encore peu structurée, d'où une difficulté à voir clairement la situation.⁵⁷ Mon point est que le champ des hybrides tend à brouiller la lecture « élémentaire » classique minéral/organique, héritée des structures universitaires d'après-guerre. Ce faisant, il s'inscrit pleinement dans le renouveau de chimie des solides. Les « nanomatériaux » pour leur part se rapprochent du solide par leur volume global et de la molécule par la taille de leurs hétérogénéités structurales. Ils pourraient ainsi poser le même genre de question sur la situation qu'ils occupent sur le territoire de la chimie.

VIII.1.2.3. De l'Université à l'industrie : influences et différences.

Sur les relations Université/industrie, je voudrais revenir sur deux thèmes principaux : premièrement, la question de l'interface entre les deux sphères qui questionne la dualité fondamental/appliqué ; deuxièmement, l'organisation propre de la recherche industrielle dans ses différences avec l'université.

Comment le solidiste universitaire perçoit-il l'industriel ? Tout dépend du point de vue, ce qui est caractéristique de relations ambiguës. Ceux qui sont intéressés par la recherche

⁵⁵ « PT : Pourtant on m'a beaucoup parlé du lien entre structure et propriétés justement ? – AM : Alors là, s'il y a un lien qui est très peu établi, c'est celui-là. Dans les métaux organiques, c'est le noir complet. On s'est que certaines molécules conduisent à des familles de solides intéressants mais pour en trouver une nouvelle, c'est vraiment la pêche à la ligne. Non, le lien entre structure moléculaire et structure du solide est complètement à établir. C'est une question non résolue aujourd'hui. » [I Moradpour, 2006, p. 5].

⁵⁶ « PT : Pour finir, comment s'est amorcé le rapprochement entre les chimies du solide organique et inorganique, qui a conduit aux matériaux hybrides ? – GO : Pour moi, ce domaine est une extension de la chimie de coordination plutôt que de la chimie du solide. » [I Ouvrard, 2006, p. 8]. « Mais la chimie douce, la chimie des hybrides, la fonctionnalisation de surface sont effectivement des domaines où les deux types de chimie cohabitent. » [I Adam, 2006, p. 9]. PT : Est-ce que vous avez l'impression qu'il y a eu un rapprochement entre la chimie des solides organique et inorganique ? – DJ : Non. Même s'il y a le laboratoire de Patrick Batail où c'est un peu le cas, c'est à peu près tout. » [I Jérôme, 2006, p. 13]. Sur l'annuaire 2000 du CNRS, ce laboratoire est rattaché à la section 18 : « éléments de transition, interfaces et catalyses » mais Batail avait auparavant succédé à Rouxel à la direction de l'IMN.

⁵⁷ « PT : Y a-t-il un lien qui passerait de la chimie du solide minérale à la chimie du solide organique ? – JG : Il n'y pas raison qu'il ne puisse pas y en avoir. Par SPS par exemple, on peut associer un polymère et un métal. – PT : Oui d'accord mais concrètement ça existe (rire) ? – JG : Si, absolument, il y a toute une chimie qui s'est développée qui est très intéressante : les scientifiques qui travaillent sur les molécules précurseurs qui servent pour fixer les oxydes, pour former des structures originales. Les deux se marient très bien. Avec des précurseurs organiques et organo-métalliques, on peut former des composés qui ne sont vraiment plus que de la chimie du solide minérale au bout du compte. Il ne faut récuser aucune chimie, c'est dramatique quand certains pensent que leur petit domaine, c'est toute la chimie. J'aime forcément mon domaine mais tous les autres domaines sont importants. Un bon chimiste du solide ne peut pas ignorer ce que la nature a fait, toute la minéralogie, la plupart des minéraux, la nature les a faits bien avant les chimistes du solide : le pyrochlore existe dans la nature, les pérovskites aussi, les grenats, le diamant... » [I Galy, 2006, p. 19-20].

fondamentale déplorent le virage appliqué induit par une pression trop forte des financements industriels. Soit parce qu'ils n'ont pas d'illusion sur le type de recherche que l'industriel désire (Caro, Dexpert), soit parce qu'ils pensent que l'industriel français ne comprend pas l'universitaire, donne des moyens ridicules, utilise les subventions publiques et a des exigences au-dessus de ses moyens (Galy, Hérold).⁵⁸ Ceux qui se sont orientés vers la recherche appliquée pensent au contraire que l'industrie, par ses exigences pragmatiques, renouvelle la créativité (Rousset, Lucas). Ces derniers sont enclins à se prononcer pour le transfert de technologie, le dépôt de brevets par les universitaires et une science utile.⁵⁹ L'utilité a elle aussi des sens très différents : elle peut être directement économique (fibres optiques fluorées) ou liée à la société de manière plus lâche, ce qui n'est alors pas contradictoire avec une recherche fondamentale. En effet, l'une des idées sous-jacentes fortes des solidistes français est la continuité épistémologique qui va du fondamental jusqu'à l'appliqué.⁶⁰ Chacun des acteurs possède sa propre ligne de démarcation entre recherches fondamentale et appliquée, qui ne correspond pas à une dichotomie université/industrie : un industriel peut tout à fait financer une recherche fondamentale (cas de la CGE pour Collongues, voire la mener *Bell Labs*). Comment comprendre cette distinction personnelle plus ressentie qu'explicitée par les acteurs ? La coupure fondamental/appliqué se comprend dans une double perspective : communautaire et personnelle. Collectivement, le groupe fixe un niveau moyen qui donne une certaine importance à chacun des deux termes fondamental et appliqué. Globalement au cours de la période 1950-2000, ce niveau tend à se déplacer vers les applications. Au sein du groupe ensuite, chacun des membres se positionne vis-à-vis de la moyenne collective. On peut remarquer des écarts entre la position que le chercheur se donne mentalement et celle qui lui est conférée par les autres. Tout dépend de la référence considérée. Un laboratoire universitaire comme le CIRIMAT fait un travail fondamental par rapport à l'industrie mais appliqué par rapport à la moyenne de la communauté des solidistes français. Relativité de la distinction vis-à-vis de la référence choisie et non pas absolu. Le chimiste du solide joue alors sur deux facteurs : l'acceptation/refus de contrats industriels (financement mais restriction de l'autonomie par les objectifs à atteindre) ; le choix de sujets intéressant la communauté (qui est elle-même partiellement déterminée par la société).⁶¹ Par

⁵⁸ « Je n'ai jamais été contre [une collaboration...] *PT : Les industriels français demandent l'aide des pouvoirs publics ?* – JG : Oui presque toujours : on va faire un truc mais à condition que le ministère subventionne. [...] Ici, il faut qu'il y ait une BDI avec le CNRS, et l'industriel ne donne pas grand chose en plus. C'est un problème, il faudrait que l'université française soit plus connectée avec l'industrie – je ne suis pas contre – mais il faudrait aussi que les industriels prennent conscience qu'on ne peut pas demander une recherche qui les intéresse très directement, qui n'est pas toujours proche des thèmes de laboratoire, sans contrepartie. » [I Galy, 2006, p. 18]. « On me reprochait aussi de faire une recherche trop fondamentale. Pourtant, nous avons apporté au Carbone Lorraine une solution simple à un problème difficile en remplaçant l'acide nitrique, dont les vapeurs rousses sont interdites, par le persulfate de potassium. » [I Hérold, 2007, p. 7].

⁵⁹ « De façon générale, je pense qu'il faut déposer plus de brevets. La France est assez à la traîne en matière de dépôt de brevets. » [I Rousset, 2006, p. 10]. « Combien de fois m'a-t-on demandé : "à quoi vous servez ?" ? J'ai un bon dossier mais j'ai de nombreux collègues en chimie orga qui sont malheureux à ne pas savoir que répondre. » [I Lucas, 2005, p. 12].

⁶⁰ « Ce qui est assez catastrophique en France, c'est cette espèce d'idée qu'on peut développer des médicaments indépendamment des mathématiques, de la physique, de la chimie... Si on ne fait pas marcher tout ça en même temps, c'est une catastrophe. Ce ne sont pas les médecins qui ont inventé le laser pour recoudre les cornées dans les yeux, non c'est Kastler qui a développé le pompage optique, c'est loin, plus personne ne le sait mais c'est le départ du laser, c'est comme ça » [I Galy, 2006, p. 19].

⁶¹ « Comme tout chimiste de l'état solide, je suis très préoccupé par la perspective de l'application pratique. Mais, en tant qu'universitaire, je me refuse à considérer cette application pratique comme le moteur exclusif de mon action. Je tiens à rester dans le domaine d'une recherche fondamentale, qui me permet d'approfondir des problèmes structuraux ou des mécanismes réactionnels, que la seule considération de l'aspect pratique pourrait conduire à écarter. [...] Mais je tiens aussi à rester au contact des réalités industrielles et de la recherche appliquée, et je sollicite toute forme de collaboration dans ce domaine. » [Flahaut, 1976, p. 27-28]. « On a des

ses choix, chaque acteur se positionne au sein de la communauté (N membres) et contribue à en déplacer un peu (1/N) le centre de gravité. Par conséquent, l'autonomie du chercheur, qui n'outrepasse pas la déviance tolérée par la matrice disciplinaire (sous peine d'exclusion), consiste à choisir un équilibre personnel entre fondamental et appliqué. Qui de l'influence industrielle ou du dogme communautaire est le plus contraignant pour le libre-arbitre du chercheur ? Question insoluble sans doute.

Le transfert de technologie est un autre point d'incrédulité de la part de nombreux chercheurs universitaires. Comment changer d'échelle pour passer du tube à essai à la tonne de produit ? De la chimie des éléments toxiques à une production de masse plus respectueuse de l'environnement ? Souvent les critères pour décider si un produit est bon changent quand il migre du laboratoire à l'industrie. Recours à des éléments toxiques, utilisation de solvants, développement de techniques raffinées ou coûteuses en énergie ne sont pas forcément transposables dans une démarche de production à grande échelle. Les « procédures » ne sont pas les mêmes. Une opération simple au laboratoire peut se révéler très compliquée en usine⁶². Sorte de Rubicon épistémologique, le passage progressif d'une logique « sur papier » à une logique « sur pièce » en constitue probablement l'élément central. Il ne s'agit pas ici d'une limite institutionnelle, qui serait facile à saisir (entre université d'un côté et industrie de l'autre). Pour l'universitaire, la sphère industrielle oppose un mur de secret à l'horizon communautaire d'échange. Si le dépôt de brevets a été aussi peu efficace pour les solidistes français (VI.3.2.3), c'est, disent-ils, parce qu'il est difficile de suivre le solide lorsqu'il atteint l'industrie : sa trajectoire du produit fabriqué au produit commercial se perd dans un dédale de mises au point et de certifications classées top-secret. D'autre part, il semble que la frontière s'ouvre à sens unique : le produit commercialisé ne revient jamais sur le territoire universitaire pour raconter son histoire à ses "pères" et retrouver ses racines originelles.⁶³

lignes directrices à caractère fondamental, un savoir-faire expérimental mais on est toujours influencé aussi par les bailleurs de crédits. Il y a des interactions positives. » [I Tournoux, 2006, p. 10].

⁶² « les industriels ont des façons de raisonner et de travailler qui ne sont pas les nôtres. Par exemple, pour le sucre soufré, on avait un mode opératoire avec une évaporation de solvants par *rotavap* (évaporateur rotatif), comme d'habitude, ils ne voulaient pas en entendre parler (rire) ! Ils ne peuvent pas transposer ça comme on la fait au labo, ils font appel à d'autres techniques qu'on ne connaît pas. Pour un labo comme le mien, c'est très difficile d'interagir avec un industriel qui demande d'autres procédures. Le passage du laboratoire au stade pilote qui permettra ensuite d'aller au niveau industriel n'est pas évident, on est incapable de le faire dans un laboratoire universitaire, et pourtant l'évaporation est quelque chose de simple. Souvent, ça ne marche pas pour des raisons purement techniques, bassement techniques, ou demander plusieurs années d'effort. » [I Moradpour, 2006, p. 10]. « L'un des volets très importants est le transfert vers l'industrie de nos activités: c'est la marque de notre laboratoire. Pour cela, j'ai mis en place il y a à peu près 15 ans un atelier pilote d'élaboration, qui comporte de gros réacteurs de l'ordre de la centaine de litres et des fours de grandes dimensions, de façon à faire des traitements thermiques non pas pour obtenir des grammes de poudre mais pour obtenir des dizaines de kilogrammes de poudre. [...] C'est très important pour un industriel parce que quand vous lui proposez quelques milligrammes de produit, il ne sait pas si votre procédé est transposable. Il y a effectivement de nombreux produits synthétisés dans les laboratoires qui restent dans les tiroirs. Nous essayons de faire la démonstration que nous sommes capables d'effectuer ce changement d'échelle et, si nous réussissons, il y a de fortes chances que l'industriel puisse faire le passage du kilo à la tonne. » [I Rousset, 2006, p. 5-6]. « Le plus souvent les solvants sont organiques, donc quasiment impossible à transférer industriellement – on n'aime pas trop les solvants dans les usines (rire) –, dans des milieux très dilués, etc. » [I Maestro, 2007, p. 6].

⁶³ « J'ai synthétisé ce produit-là, c'est tout ! je n'ai pas eu de retour, je ne sais pas si ça a été utilisé. Le second problème appliqué sur lequel j'ai travaillé est celui que j'ai évoqué au tout début : les sels d'ions radicaux du pérylène avec Thomson qui voulait utiliser ça pour faire des détecteurs de métaux pour les sous-marins, on a fait deux brevets là-dessus. – PT : *Il y a eu des applications ?* – AM : Ça a été amorti complètement, je n'en ai jamais entendu parler. Je crois que ça n'a jamais été utilisé, ils ne l'ont pas vendu mais on a seulement breveté. Le brevet n'a jamais été utilisé. Je suis donc un peu perplexe quand on parle d'applications. On peut faire des applications qui sont possibles sans que pour autant elles soient utilisées après. C'est très frustrant ! » [I Moradpour, 2006, p. 10].

Domine donc dans l'ensemble un sentiment profond d'étrangeté des deux mondes universitaire et industriel. Un industriel cache ses options stratégiques. Pour la multinationale qui dispose de moyens financiers, le brevet constitue un levier important de sa politique. Sur le marché, l'ensemble de ses brevets représente une valeur (déterminée par le conseil d'administration) que l'industriel est prêt à payer pour se défendre et assurer un retour sur investissement profitable.⁶⁴ Le laboratoire industriel n'est pas régi par les mêmes règles de vie que l'universitaire. Il s'agit pour celui-ci de fabriquer des produits originaux, pour celui-là de fabriquer des produits commerciaux, c'est-à-dire rentables.⁶⁵ Le premier est tourné vers une cause, le second vers une conséquence. La finalité industrielle conduit à se concentrer sur l'application voulue (propriétés, synthèse facile, critères de fiabilité...) quelles que soient les matières premières employées. Pour des fabricants français de matériaux comme Rhodia ou Saint-Gobain, la chimie du solide est diluée au sein d'un ensemble plus vaste, « chimie des matériaux » à un premier niveau, « science des matériaux » à un second niveau.⁶⁶

Une telle conception a deux conséquences : l'une épistémologique, l'autre sociale. C'est le matériau qui, dans l'industrie, est pris comme mesure de toute chose, c'est-à-dire une matière finalisée, utilisable. Le matériau peut être solide, liquide ou mou, minéral, organique ou hybride, tridimensionnel, lamellaire ou amorphe. Le solide cristallin minéral, qui a constitué le référent hégémonique de la chimie du solide universitaire sur la période 1950-1980, ne joue ici qu'un rôle parmi d'autres. De manière concomitante, l'organisation des laboratoires de recherche d'Aubervilliers (Saint-Gobain et Rhodia) se distingue de la recherche universitaire. Même s'il existe des sous-laboratoires dédiés aux solides minéraux, aux polymères, aux sols-gels..., on vise ici au décloisonnement pour atteindre un objectif commun : la mise sur le marché d'un matériau rentable.⁶⁷ Il faut alors souvent inventer des

⁶⁴ « PT : Mais entretenir tous ces brevets coûte combien ? – PM : Ah ! ça coûte cher. Je ne vous dirai pas ce que ça coûte parce que c'est confidentiel mais ça coûte très cher à la fois pour les déposer, pour les entretenir auprès de l'office européen et mondial des brevets et pour les défendre parce que si vous avez un brevet que vous ne défendez pas, ça ne sert à rien. Nous avons donc des équipes dédiées qui suivent de près ce qui se passe. Mais ce coût a un vrai retour sur investissement, c'est une partie de la valeur du business que vous développez grâce à vos brevets. » [I Maestro, 2007, p. 8].

⁶⁵ « PT : Au moment des crises pétrolières par exemple, vous n'avez pas travaillé spécifiquement sur les piles à combustible ? – PM : Non, nous n'avons pas fait de recherches sur les piles à combustible chez Rhodia. Nous sommes fournisseurs de matériaux et si personne ne fabrique ces piles, nous n'avons pas intérêt à commercialiser les produits de base. Néanmoins nous suivons le domaine de loin parce que nous avons mis au point la meilleure poudre pour électrolyte solide à base d'oxyde de Cérium dopé au Gadolinium au monde mais aujourd'hui, il ne s'en vendrait qu'une tonne ou deux. Le marché actuel n'est pas suffisant pour se lancer dedans mais si un jour ça se développe, on sera là et on pourra lancer notre matériau. » [I Maestro, 2006, p. 7].

⁶⁶ « Chimiste du solide, absolument ! (rire) Mais je pense qu'aujourd'hui ça ne veut plus dire grand-chose, après cinquante ans de chimie du solide. Le solide peut être organique ou inorganique, c'est un mélange de physique et de chimie... Si je devais définir par un terme plus précis, ce serait science des matériaux. » [I Maestro, 2006, p. 2].

⁶⁷ « PT : Il me semble qu'au niveau universitaire on se réclame beaucoup de la chimie des matériaux justement alors que les communautés sont extrêmement compartimentées, chimie du solide, chimie des polymères... Ces barrières-là sont-elles tombées pour les industriels ? – PM : Complètement, elles sont tombées sinon on ne pourrait pas faire de matériaux. Prenons un exemple : quand on fait un polymère thermoplastique, on veut qu'il ait des propriétés mécaniques ou thermomécaniques qui se rapprochent de plus en plus proche du métal – on n'y arrivera pas mais bon, pour alléger les voitures on met de plus en plus de polymères –, le polymère nu n'a pas de propriétés mécaniques. Pour renforcer, on met soit des fibres de verre, soit des petites particules. On peut dire aussi qu'on veut des charges lamellaires exfoliables : la chimie du solide vous en fait une grande quantité – Michel Tournoux était un grand spécialiste de ça – mais si vous les mettez directement dans un polyamide, vous risquez de ne pas avoir les propriétés recherchées. Il faut faire une exfoliation avec un degré d'exfoliation donné qui va permettre d'intégrer la particule avec la bonne propriété finale au niveau mécanique. C'est pareil si vous prenez de la silice : il n'y a pas plus simple que SiO₂ comme composition mais ensuite, vous avez diverses structures : amorphes, cristoballites, quartz... Or la silice est un très bon agent de renforcement du pneumatique mais pas n'importe laquelle. Il faut travailler sur la synthèse pour obtenir la bonne taille de particule de silice et les bons couplages avec le caoutchouc pour pouvoir bien le renforcer. » [I Maestro, 2006, p. 3].

matériaux hybrides qui requièrent les compétences de solidistes, de polyméristes, de verriers, de physiciens... Plutôt que d'opérer par collaboration entre entités distinctes (comme le font les laboratoires universitaires de chimie du solide), les chercheurs d'horizons différents sont rassemblés au sein des mêmes équipes. À la pluridisciplinarité universitaire, on espère substituer une dynamique interdisciplinaire. L'industriel regrette que l'universitaire reste souvent concentré sur le solide de synthèse plutôt que sur le matériau fini. Il définit alors le solidiste moderne de la période 1980-2000 comme celui qui parcourt le chemin du solide fondamental au matériau. La recherche de nouvelles compositions chimiques est dévalorisée au profit de la mise en forme (VII.2, VII.3). Ainsi, l'industriel a un discours descriptif sur la recherche industrielle et un discours normatif sur ce que devrait être la recherche universitaire. Tout comme l'universitaire épris de fondamental regrettait les demandes trop appliquées de l'industrie, l'industriel juge la chimie du solide universitaire en fonction de ses propres centres d'intérêt. Il milite pour que la chimie des solides devienne chimie des matériaux, appelle de ses vœux une plus grande interaction au sein des entités universitaires, valorise un mélange de gens et de genres. Que la créativité jaillisse du métissage culturel !⁶⁸ Tel est d'ailleurs l'un des dogmes des *Materials Science and Engineering* [Bensaude-Vincent, 2001 ; 2001b].

Le point de vue industriel brouille donc les spécificités marquées dans la communauté universitaire au profit d'une culture multidisciplinaire. On peut ainsi distinguer trois niveaux d'hétérogénéité sociale : l'école de recherche, la communauté universitaire, la science des matériaux. Pour la chimie du solide universitaire, ce sont les deux premiers niveaux qui sont pertinents dans l'analyse (chapitres III, IV). Pour l'industriel, l'école de recherche disparaît (sauf pour l'individu qui en est issu), la communauté de chimie du solide devient une « culture » homogène, et c'est la science des matériaux qui constitue l'espace de discussion approprié pour des chercheurs possédant diverses cultures (chimie du solide, polymère, optique, organique...). Un tel brouillage disciplinaire rappelle vaguement les évolutions récentes de la chimie des solides universitaire (VI.3.3.3). Est-ce à dire qu'en cinquante ans la recherche universitaire a globalement opéré un glissement vers les logiques industrielles ? Il me semble que l'avènement de la rhétorique matériaux dans les sphères politique et industrielle des années 1960 (III.4.3) sans modifier vraiment l'organisation institutionnelle de l'université – le PIRMAT n'a duré que quelques années (VI.3.3.2) – n'en a pas moins recomposé le système de pensée universitaire en élevant le métissage culturel au rang de dogme nouveau. Tendence perceptible à l'Université dans le passage de la chimie du solide (1950-1980) à la chimie des solides (1980-2000).

Dans cette perspective, la vague *Materials Science and Engineering* en provenance des États-Unis a semble-t-il d'abord pénétré la sphère industrielle – plus perméable aux influences étrangères – avant de toucher l'université et le CNRS. Des entreprises privées comme Saint-Gobain, Pechiney, Thomson CSF, CGE-Alcatel et les organismes publics à

⁶⁸ « certaines industries sont encore très monocultures – la métallurgie par exemple – mais des industries comme Rhodia ou Saint-Gobain sont des industries dans lesquelles, de plus en plus, on mélange des cristallographes, des physico-chimistes, des chimistes « vrais » au sens de chimistes de synthèse minérale ou organique. Dans l'organisation de la recherche d'une école comme l'ESPCI, c'est pareil – avec des individualités qui sont difficiles à mettre ensemble –, vous avez des minéralistes, des physico-chimistes, des physiciens durs, des opticiens... C'est indispensable pour l'industrie et c'est ce qui fait la force de certains labos ou instituts qui arrivent à faire travailler ensemble ces gens-là... Des gens comme Jean Rouxel à Nantes ou Livage à Paris ont fait faire une évolution importante à la chimie du solide parce qu'ils ont fait évoluer le cristal vers le produit fini. Pour nous, c'est le mélange, le croisement des compétences qui est important. Ce qu'a parfois raté la chimie du solide traditionnelle. Les labos qui sont restés purement chimie du solide ont sûrement du mal à exister aujourd'hui parce qu'on a fait un peu le tour de toutes les propriétés. Chercher la dix millièmes phase d'YBaCuO substituée pour faire un supraconducteur est un peu lassant, surtout quand on augmente de 0,1K par 0,1K (rire). Il vaut mieux travailler à mettre en œuvre l'YBaCuO de manière à améliorer l'anisotropie des particules ou les joints de grain pour que le courant passe mieux, etc. » [I Maestro, 2007, p. 3].

vocation appliquée comme l'ONERA ou le CEA ont très tôt, dès les années 1960, développé des centres de recherche du type institut interdisciplinaire où s'agrègent des équipes d'horizons culturels distincts.⁶⁹ Ces instituts préfigurent en quelque sorte la vague de réorganisation institutionnelle qui débute à la fin des années 1980 à l'université (VI.3.1). Si ce décalage de vingt ans entre université et industrie ne constitue pas un retard dans la mesure où l'histoire n'est pas prédéterminée par un progrès linéaire, il n'en donne pas moins un indice de l'attachement des solidistes à une certaine conception de la matière.

VIII.1.3. Une épistémologie sociale de la matière

La chimie du solide française se pense elle-même sur le mode double d'une communauté sociale avec de multiples voisins (VIII.1.2) et d'une représentation spécifique de la matière. Celle-ci s'est façonnée sur un tissu universitaire traditionnel, hérité de l'entre-deux-guerres (chapitres I, II), sur la croissance de la sphère scientifique d'après-guerre (chapitre III) et sur des individualités fortes (chapitre IV). Pour un solidiste, la matière pose un triple défi : créativité, contrôle, finalité. Le premier est a priori et engage l'art du chimiste ; le deuxième a posteriori et flirte avec la physique ; le troisième in fine et engage la société dans son ensemble.⁷⁰ Le triptyque que les pionniers se sont attaché à énoncer : structure-propriétés-applications pourrait de fait paraître incomplet puisqu'il lui manque la synthèse. Cet oubli provient d'une envie de se démarquer de la chimie traditionnelle. À leurs yeux, la synthèse est déjà présente, en filigrane, dans la « structure » – des structures oui mais nouvelles ! –, qui induit des propriétés, qui sous-tendent des applications. Pour preuve, l'importance des cristallographes au cours des années 1960, 1970. Avec l'essor de techniques permettant de voir à l'échelle atomique (microscopie électronique), la « chimie du solide » peut être comprise littéralement comme la chimie qui se produit au cœur du solide. Par la suite, les générations de chimistes des solides, ne souffrant plus de complexes vis-à-vis de la chimie traditionnelle, se chargeront d'ailleurs de bien souligner la primauté de la synthèse et l'importance de voies alternatives (VI.1).⁷¹ Tel est le tripode sur lequel est fondée la chimie du solide : un objet neuf, porteur de qualités, que l'on va faire fructifier. Des variantes sont possibles : la liaison chimique par exemple est souvent évoquée comme vecteur entre structure et propriétés ; on s'approche aussi plus ou moins des applications par la « mise en forme » (VII.2). Finalement, la communauté française propose une « palette » de tendances

⁶⁹ « *BBV : Pourriez vous préciser ce qu'il en est de l'essor de la recherche en matériaux en France ?* – JF : [...] Si vous prenez le sens restreint d'une recherche dans un institut analogue aux instituts de recherche en matériaux américains, je vous répondrai que cela débute bien avant le mot matériaux dans quelques laboratoires industriels comme Saint Gobain, Pechiney, Thomson CSF, CGE Alcatel comme dans les organismes de recherche appliquée, en particulier à l'ONERA (Office national en recherches aéronautiques) et au CEA (Commissariat à l'énergie atomique). Le CEA a eu, dès le départ, des sections de recherche fondamentale mais aussi beaucoup d'activités science des matériaux, où il fallait fabriquer quelque chose pour quelque chose de précis dans un but donné. De même à un moindre niveau, l'IRSID pour la sidérurgie, l'ONERA pour l'aviation et l'Ecole des mines de Paris dans son centre de Corbeil puis de Sophia Antipolis, ont développé assez tôt une approche génie des matériaux, reprise par l'université de Compiègne. » [I Friedel, 2001, p. 4].

⁷⁰ « La difficulté de la recherche – je devrais plutôt dire de la découverte – dans les sciences expérimentales réside dans le fait qu'elle présuppose l'alternance de deux démarches intellectuelles bien différentes. L'une est faite d'imagination et de méfiance à l'égard des idées reçues : elle s'apparente à création artistique. C'est la seule qui soit source de réels progrès. L'autre est faire de patience et de stricte soumission à la logique contraignante des méthodes et des machines. C'est la seule qui apporte les certitudes. » [Bénard, 1980].

⁷¹ « *GO : Ma définition de la chimie du solide, ce serait un tétraèdre : 1) synthèse, 2) structure (mais à toutes les échelles, de l'angström à la morphologie), 3) propriétés, 4) application qui découle principalement des propriétés et pas trop des deux autres facteurs.* » [I Ouvrard, 2006, p. 3-4].

de la chimie du solide traditionnelle (chapitre IV) à la science des matériaux (chapitre VII) en passant par une chimie des solides (chapitre VI).⁷²

Ce tripode s'est élaboré pendant plus de trente ans dans l'étude d'un unique objet : le solide minéral. La chimie de l'état solide a d'abord été une chimie minérale se spécialisant sur l'état solide (1950-1960). Chimie minérale qui extrait traditionnellement ses composés de la terre, de la mine. Devenue chimie du solide, la communauté s'est longtemps focalisée sur les oxydes, les chalcogénures, les halogénures, les alcalins... Ce faisant, elle ne s'est occupée ni d'organique, ni de biologique.⁷³ La molécule (organique ou biologique) est éloignée du solide et brûle à haute température. Cette focalisation durant plus de trois décennies sur le solide minéral distingue nettement la chimie du solide de la physique du solide. Celle-ci s'est développée à partir de la physique du métal d'abord puis s'est très vite diversifiée vers les solides minéraux, les cristaux liquides, les métaux organiques... pour devenir physique de la matière condensée. L'appellation physique « des » solides, utilisée dès les années 1960 par le laboratoire d'Orsay (LPS), met bien en évidence cette pluralité des objets d'étude par opposition à la chimie « du » solide, sous-entendu minéral. La situation plus diversifiée des vingt dernières années (1980-2000) change quelque peu la donne avec l'accélération des croisements « élémentaires » suite à l'essor de la chimie douce, qui a conduit à la fabrication d'hybrides, au greffage de molécules entre des plans atomiques. Chimie du solide, chimie douce, chimie des matériaux : succession de termes mais aussi superposition des communautés et complexification d'une situation récente où le cristal minéral perd peu à peu son statut hégémonique.⁷⁴

Serait-ce finalement la continuité épistémologique, dont rêvait Chaudron pour la chimie de l'état solide vers 1950, qui advient à la fin du millénaire ? Probablement pas parce que si Chaudron avait embrassé un vaste territoire du solide (métal, minéral, organique), ses élèves – comme lui d'ailleurs – ont accepté le découpage universitaire français qui distingue résolument les métallurgistes des chimistes, les minéralistes des organiciens.⁷⁵ Au contraire,

⁷² « Il y a aussi en France toute la palette continue allant de la chimie du solide pure et dure à la science des matériaux pure et dure. Les deux motivations sont cependant différentes : savoir et comprendre l'origine d'un phénomène et créer des corps nouveaux ou améliorés pour répondre à une propriété, dans le premier cas, aboutir à un objet de propriétés optimisées, notamment par leur procédé de mise en forme, dans le second cas. Parler de cristaux, de couches minces, de céramiques, de verres, de nanopoudres, etc. ... ou de procédés (sol-gel par exemple) c'est bien sûr de la science des matériaux. Mais quid par exemple de procédés comme la synthèse hydrothermale ou le CO₂ hypercritique qui peuvent aussi conduire à des composés totalement nouveaux. C'est aussi de la chimie du solide. » [I Pouchard, 2004, p. 33].

⁷³ « PT : *La biologie, vous ne la mettez pas dedans ?* – PM : Pas du tout. Il y a la physico-chimie et les sciences du vivant. Bien sûr, on peut dire qu'on fait de plus en plus de tests magnétiques avec des particules – nano ou même des ions – luminescentes mais il n'y a rien à prédire puisque on est déjà sur l'ion, il y a des choses à faire quand même, le vectoriser au bon endroit, etc. C'est intéressant dans la mesure où c'est une nouvelle évolution : des gens de la chimie du solide, de la physique, de la matière molle vont vers la biologie et produisent des choses intéressantes. Pour moi, on est là très loin de la chimie du solide. » [I Maestro, 2007, p. 3]. « L'un de mes échecs est de n'avoir pas développé les terres rares dans les composés organiques par exemple. J'avais confié ça à un type qui n'était pas très doué donc ça n'a pas marché. Pourtant je reste persuadé qu'il y a des études fantastiques à faire et simples. Ce n'est toujours pas fait, c'est un vaste domaine. » [I Caro, 2005, p. 17].

⁷⁴ « PT : *Est-ce le pendant en chimie de la physique du solide ?* – GO : Non, la comparaison avec la physique du solide n'est pas bonne. La physique du solide est une discipline ancienne, bien établie, aux contours bien définis. C'est tout le contraire pour la chimie du solide : elle est récente, peut porter d'autres noms, ses frontières ne sont pas faciles à déterminer. La chimie du solide s'étend vers la physique, l'optique et le magnétisme, vers les applications, l'électrochimie, le transport de charge... Elle est reliée à bien trop de choses et son périmètre est trop difficile à définir. » [I Ouvrard, 2006, p. 8].

⁷⁵ « Je crois que ce n'est pas différent puisque les métallurgistes sont restés avec les chimistes du solide dans le même *pool*. En métallurgie, il y a la vision du physicien qui va regarder surtout dans le domaine des propriétés mécaniques. À l'heure actuelle, quand je discute avec les métallurgistes, je n'ai pas de problème pour comprendre les structures, après pour faire la chimie des alliages, je ne suis pas compétent, je n'en ai jamais fait [...] De la façon dont je vois le solide, il n'y pas de rupture entre la vision sur les grands composés

le début du vingt et unième siècle est marqué, me semble-t-il, en France, par l'essor d'un mode transversal qui enjambe les groupes institutionnalisés (communautés ou laboratoires) en tissant un réseau diffus de relations individuelles. Pour les acteurs de chimie des solides (chapitre VI), le cristal puis l'état solide ont cessé d'être des référents uniques (amorphes et sols-gels sont désormais courants) tandis que les composés minéraux sont plus largement associés aux composés organiques dans des édifices hybrides de plus en plus complexes. Avec la disparition du pilier « solide minéral », l'architecture communautaire de la chimie du solide se démonte brique à brique à la fin du siècle pour reconstruire d'autres groupes partageant d'autres dogmes sur d'autres composés matériels.

VIII.2. Les alternatives occidentales : Europe et États-Unis

Jusqu'à présent, mon récit s'est focalisé sur un territoire national avec quelques excursions en pays étrangers. Or, la science occidentale se veut universelle. Ses mutations durant la deuxième moitié du vingtième siècle renforcent la dimension internationale. Le spécialiste mondial d'un élément chimique – comme ont pu l'être Hackspill pour les alcalins ou Jolibois pour les phosphates – n'existe plus. Plusieurs équipes sont aujourd'hui en concurrence sur un même sujet de par le monde.⁷⁶ Même si l'évolution a été collective (chapitre III), Hagenmuller est sans doute le Français qui a le plus œuvré à l'étranger pour la chimie du solide française.⁷⁷ En d'autres termes, c'est autour de son nom qu'a cristallisé la reconnaissance internationale des solidistes français. Dessiner un paysage de la chimie du solide internationale dépasse largement les limites de ce travail. En revanche, on peut essayer de comparer l'étude de cas nationale à d'autres situations européennes (VIII.2.1) – en particulier l'Allemagne – ainsi qu'aux États-Unis (VIII.2.2). D'autres comparaisons plus ponctuelles pourront aussi être évoquées.

Une telle démarche interroge de manière transversale la signification de l'objet scientifique : quels sens donnent aux bronzes de vanadium un cristalochimiste français des années 1960, un *Materials scientist* américain des années 1970 ou un physicien japonais des années 1990 ? Puisque les études entreprises sont situées dans le temps et dans l'espace, qu'elles se démarquent par des perspectives différentes, parle-t-on encore du même objet scientifique ? Les sciences expérimentales, éprises de réalisme, tendent à répondre "oui" sans ambages. N'est-ce pas pour cette raison, pour reconnaître une unicité de l'objet étudié, qu'elles ont forgé un langage normé ? L'historien, au contraire, s'il peut trouver commode d'utiliser le même langage pour décrire deux époques, est attentif à la signification historique des mots. C'est pour cela qu'il me semble intéressant de poser ici la question de la pertinence d'un nominalisme scientifique qui se voudrait universel et intemporel (VIII.2.3). Que se

métallurgiques, sur les alliages... et sur les composés minéraux [...] Les chimies ne s'excluent pas, elles se complètent, à un moment donné, elles se recouvrent. Il y a une vision que j'appelle chimie du solide qui va aller jusqu'aux métaux et puis il y a le côté moléculaire qui va aller des complexes organométalliques jusqu'à la chimie organique pure. Ça ne s'arrête pas, la structure du composé fait juste que l'on regarde avec un œil un peu différent. » [I Galy, 2006, p. 22].

⁷⁶ « PT : Voulez-vous faire un commentaire sur l'évolution au cours de cette époque 1950-2000 ? – AH : [...] la recherche est devenue mondiale sur tous les sujets, ce qui est un progrès important. » [I Hérolde, 2007, p. 9].

⁷⁷ « I first met professor Hagenmuller early in the 70s, he was my first contact. Then I met Jean Rouxel during the 70s and we became close friends. [...] Hagenmuller was the leader in France » [I Simon, 2005, p. 1]. « you know that this evolution is related to Paul Hagenmuller. He was – and he is – a great scientist and a good politician at the same time. It is mainly his merit to induce this movement in France in my opinion. » [I Jansen, 2005, p. 4].

passé-t-il pour l'énoncé ou l'objet épistémologique à la traversée des frontières sociales et historiques ?

VIII.2.1. Convergences et divergences en Europe occidentale

VIII.2.1.1. L'Allemagne : une tradition chimique séculaire

L'après-guerre représente pour l'Allemagne une période d'ostracisme scientifique décrétée par la communauté internationale. Les Allemands ne sont plus invités aux congrès de chimie de l'état solide : aucun n'assiste au congrès des réactions dans l'état solide à Paris en 1948 ; un seul (chercheur de BASF) est invité au dixième Conseil Solvay (1956). De manière discrète, les Alliés récupèrent des scientifiques allemands de l'Ouest – environ cinq cents sont "invités" à séjourner aux États-Unis [Walker, 1997] – ainsi que des informations intéressantes, à travers des enquêtes comme le rapport FIAT (II.1.2.1).

Ce n'est qu'en 1956 qu'un Allemand, Wilhelm Klemm, est invité à la Société chimique de France pour présenter ses travaux sur des solides originaux : oxydes et fluorures à valences inusuelles (III.4.2.1). Mais dès 1946, les contributions allemandes sont signalées dans le *Bulletin de la Société chimique de France*. Ce n'est pas non plus un hasard si, durant l'été 1960, Hagenmuller, alsacien rescapé des camps de concentration, emmène ses thésards en Allemagne : ils partent se familiariser avec les synthèses originales d'outre-Rhin et apprennent l'importance de la détermination structurale (qui est d'ailleurs utilisée en *Chaudronnerie* depuis les années 1930). Les Français sont unanimes pour reconnaître la créativité chimique des Allemands au cours des années 1940, 1950 que ce soit pour les oxydes et fluorures métalliques ou les composés du graphite (Rüdorff). La chimie allemande semble alors assez décloisonnée : la chimie du solide est pétrie de cristallographie et prend modèle sur la chimie de coordination. En 1960, la théorie des champs de ligands est parfaitement connue des inorganiciens allemands alors qu'elle est ignorée des minéralistes de l'état solide français (IV.4.1.2). Depuis les années cinquante et jusqu'à aujourd'hui, la chimie du solide allemande conserve auprès des solidistes français cette image d'une synthèse novatrice et originale.⁷⁸

De l'autre côté de la frontière, l'analyse de deux professeurs du *Max Planck Institut* de Stuttgart (MPI), Arndt Simon et Martin Jansen, offre un contrepoint intéressant. Ils revendiquent la première place mondiale pour la chimie du solide allemande durant les années

⁷⁸ « Les Allemands étaient de très bons chimistes, si vous voulez, dans ce sens où ils savaient préparer des matériaux qui n'étaient pas très stables et de manière pure [...]. Aller voir les Allemands était intéressant car ils aimaient bien faire des composés originaux, en particulier les peroxydes de Klemm et les fluorures. Évidemment, c'était un peu singulier, surtout quinze ans après la guerre et venant d'un ancien déporté. » [I Hagenmuller, 2004, p. 13]. « En Allemagne, [la chimie minérale] était de très bonne qualité. [...] c'était une chimie qui était déjà structurale : ils imaginaient et synthétisaient des composés nouveaux puis ils étudiaient leur structure en regardant la disposition des atomes les uns par rapport aux autres mais ils n'allaient pas plus loin. » [I Pouchard, 2004, p. 1]. « En 1939, Schleder et Wellman ont publié la première structure du composé KC_8 . Jusque'en 1950, ce sont essentiellement les Allemands qui travaillaient sur le graphite et ses dérivés. – *PT : Et par la suite ?* – AH : Rüdorff était le grand spécialiste des composés d'insertion du graphite. » [I Hérould, 2007, p. 2]. « En Allemagne, ils étaient très forts pour la synthèse [...] quand on cherchait une référence bibliographique pour une synthèse ou une structure, on allait voir du côté des Allemands qui étaient les meilleurs pour ces questions. » [I Ouvrard, 2006, p. 7].

1950 et 1960.⁷⁹ Même si ce genre de revendications posent toujours problème en sciences comme ailleurs, il y a un consensus sur la prédominance de la chimie du solide allemande au cours des années 1950-1965. Synthèse et analyse structurale sont ses deux points forts. L'Allemagne de l'Ouest abrite de multiples écoles de recherche. À tel point que la principale différence entre la France et l'Allemagne consisterait, d'après Simon, en un maillage serré du territoire allemand en laboratoires contre quelques points chauds en France. Vue des États-Unis, la situation semble différente : un après-guerre difficile avec seulement quelques laboratoires universitaires.⁸⁰ Ces points de vue croisés sont intéressants : ils suggèrent que la fin des années 1940 est difficile en Allemagne, mais que par la suite, assez rapidement, le système universitaire retrouve son éclat. La chimie du solide couvre alors l'ensemble du territoire allemand alors qu'en France à la même époque (1950-1960) le tissu n'est pas aussi dense. L'analyse de Simon perd de sa pertinence par la suite puisqu'au milieu des années 1960, en France, une quarantaine de laboratoires de chimie minérale composent la communauté française.

Au cours des années 1950 puis 1960, la communauté allemande irradie l'Europe et constitue un modèle. Elle est reconnue pour ses synthèses originales mais aussi ses études structurales et la conceptualisation qu'elles permettent (règle de Klemm-Zintle). Les « Rennais » visitent Stuttgart, Heidelberg, Giessen, Marburg, Cologne, Karlsruhe, Eilendorf... (IV.4.1.1). En termes de génération et d'influence, Klemm est comparable à Chaudron. Pour la génération suivante, Rudolf Hoppe (Münster puis Giessen) et Hans-Georg von Schnering (MPI Stuttgart) sont deux des élèves marquants de Klemm. On trouve bien sûr d'autres professeurs de la même génération (issus d'autres écoles) : Armin Weiss (Münich), Edward Zintle, Thiele (Freiburg), Oppermann (Dresden)...⁸¹

Si les héros de la mémoire germanique ne sont pas les mêmes que ceux du récit légendaire français (III.1.1), la périodisation historique elle aussi diffère. Contrairement à la France, l'émergence de la chimie du solide n'a pas été vécue en Allemagne comme une révolution durant les années 1960. Les deux professeurs allemands s'étonnent quand on parle d'une révolution de la chimie du solide après 1950. Ils considèrent que l'évolution est beaucoup plus progressive qu'on ne le pense en France et insistent sur une « continuité » des pratiques tout au long du vingtième siècle. À l'appui de leur interprétation, chacun des deux professeurs cite un personnage mythique du panthéon français : Lavoisier et Moissan – comme l'avaient d'ailleurs fait certains héritiers français –.⁸² Cette vision continuiste et

⁷⁹ « *I could give the feeling to be proud by saying that but the German solid state chemistry was extremely strong, surely the first one in the world during the 50s and 60s [...]. The Germany was in a great position for chemistry* » [I Simon, 2005, p. 1]. « *The solid state chemistry in Germany used to be very strong after the War* » [I Jansen, 2005, p. 4].

⁸⁰ « *The big difference between the two countries was that there were many places in Germany and few selected places in France where solid state chemistry was carried on.* » [I Jansen, 2005, p. 4]. « *Right after World War II, Germany emphasized the rebuilding of their industrial base. Although there was a strong solid-state chemistry tradition in Germany, the chemists like Rabenau and Hoppe were isolated in different universities and were primarily preparative and structural chemists.* » [I Goodenough, 2001, p. 19].

⁸¹ « *MJ: Well, there was a number of strong solid state schools in Germany, I can't really give the exact number. There was one big in Münster (Westphalia) where Hoppe was working at that time, then he went to Giessen where I joined him. The second big school was in Munich with Armin Weiss, a student of U. Hofmann from Heidelberg who was studying silicate chemistry. Another one was the school of Edward Zintle, whose teacher was Unicschmidt who was famous for his precise atomic weights.* » [I Jansen, 2005, p. 3-4]. « *Wilhelm Klemm and Edward Zintle had expressed the "Zintle-Klemm Rule". This rule more or less says that when compounds are isoelectronic, they have the same structure.* » [p. 1]. « *I really believe that Hoppe was the international leader of the solid state chemistry during the 50s.* » [I Simon, 2005, p. 6]. Les autres noms m'ont été fournis par Reinhard Nesper du *Laboratory of Inorganic Chemistry* de l'École polytechnique de Zürich (ETH).

⁸² « *PT: In France, the solid state chemists have the feeling that something occurs after the World War II, the birth of solid state chemistry. Have you the same impression for the Germany? – AS: I would say no. Moissan had already performed solid state chemistry at the beginning of the twentieth century. After Moissan, chemistry*

séculaire de la chimie du solide s'appuie sur une généalogie : tout comme les Français ont leurs « familles scientifiques » – par exemple Le Chatelier, Chaudron, Collongues, Vivien –, les chimistes allemands ont aussi leurs filiations – par exemple Biltz, Klemm, Hoppe, Jansen –. Le parallèle est saisissant puisque dans les deux cas les ancêtres (Biltz et Le Chatelier) ont une descendance multiple et mise bout à bout chacune des filiations embrasse la totalité du siècle (et le dépasse même).⁸³ La structure mandarinale de l'université allemande peut justifier une telle similitude [Ringer, 1969].

Pourquoi alors une telle différence dans la lecture historique ? Trois facteurs au moins entrent en ligne de compte : universitaire, communautaire, national. La chimie inorganique occupe encore aujourd'hui dans l'université allemande une place de choix, rivale comme en France de la chimie organique. La chimie du solide est demeurée une sous-discipline de la chimie inorganique : Jansen se définit comme un « *inorganic chemist* » dans le champ de la « *solid state inorganic chemistry* » [I Jansen, 2005, p. 1], Jansen et Simon ont occupé des chaires d'*anorganische Chemie*.⁸⁴ Dans cette perspective, la chimie du solide, vécue comme sous-partie d'un ensemble pluriséculaire, n'est pas pensée comme un champ autonome émergent. En revanche, elle s'inscrit dans un mouvement de « *renaissance* » propre à toute la chimie inorganique après-guerre [I Jansen, 2005, p. 3]. Deuxièmement, la rupture des années 1960 semble plus marquée en France qu'en Allemagne. Quantitativement, les Français partent de plus bas et montent plus haut en terme d'effectifs et de laboratoires. Qualitativement, les Français changent massivement de méthodes en une quinzaine d'années (1955-1970) : d'une chimie largement descriptive à une popularisation des déterminations structurales et des mesures physiques (II.1, III.4). Au contraire, la communauté allemande des inorganiciens utilise déjà largement la diffraction des rayons X au cours des années 1950 et passe aux caractérisations physiques plus lentement que les Français.⁸⁵ C'est sur cette double rupture,

becomes more formal in France whereas solid state chemistry is an empirical work. Germany has a long standing tradition and thus shows a continuity. » [I Simon, 2005, p. 5]. « PT: For solid state chemistry, do you have the feeling that there is a kind of emergence of this discipline after the war? – MJ: Emergence? If you look a little bit further back into the history in the first part of the nineteenth century, you will notice that at the beginnings of the more precise and scientific chemistry – for whom a big part was developed in France with Lavoisier –, inorganic chemistry was already a hot topic. » [I Jansen, 2005, p. 3].

⁸³ « *My personal roots go very far backwards to the 1920s, almost one hundred years ago. This school of solid state chemistry was started in Germany from Biltz, Klemm, Hoppe and then myself. It is a rather strong school. – PT: There are pupil-master relationships between all of them? – MJ: Yes! Klemm was the student of Biltz, Hoppe was the student of Hoppe and I am the student of Hoppe. Nevertheless Biltz had many students who were successful. For instance, there is a school in Norway, at Oslo.* » [I Jansen, 2005, p. 1].

⁸⁴ « *The organic chemistry was much linked to the industry and for that reason always dominates the German chemistry. Inorganic chemistry in general and the number of students in particular were smaller than for organic chemistry. The solid state chemistry as a part of inorganic chemistry was even smaller.* » [I Simon, 2005, p. 4]. « *no chair of solid state chemistry. But I think that is the same for other sub-disciplines in inorganic chemistry [...] and the chair is just called "inorganic chemistry". And of course the big faculties try to cover all fields, you can have four chairs of inorganic chemistry, one for metal organic chemistry, one for solid state chemistry and so on.* » [p. 2] « *Then [après Lavoisier] organic chemistry emerged and until the middle of the twentieth century, chemistry was dominated by organic chemistry. And then a renaissance of inorganic chemistry occurred including the solid state chemistry. From that point there is a steep increasing.* » [p. 3] « *the solid state chemistry is embedded in inorganic chemistry* » [I Jansen, 2005, p. 5].

⁸⁵ « *The solid state chemistry in Germany used to be very strong after the War but the increase in France was much more dramatic. New places in France were won by solid state chemistry and emerged* » [I Jansen, 2005, p. 4]. « *Quand je disais à Klemm, il faut faire plus de physique, il me disait oui pour caractériser les matériaux et quand je lui disais pour étudier les propriétés, il disait, ça c'est votre génération, moi je suis plus chimiste que vous. Mais c'était un bon ami à moi. Il était docteur honoris causa de notre université à une époque où ce n'était pas évident. – PT : Et Glemser ? – PH : Glemser était une forte personnalité, il a fait de très bonnes choses. C'est un très bon chimiste mais pas très ouvert sur la physique. Les Allemands étaient de très bons chimistes, si vous voulez, dans ce sens où ils savaient préparer des matériaux qui n'étaient pas très stables et de manière pure mais ils s'intéressaient peu à la physique sauf pour caractériser les matériaux nouveaux qu'ils avaient préparés.* » [I

qualitative et quantitative, que la communauté française a bâti son identité, en particulier sa légende. Enfin, troisième facteur : la Deuxième Guerre mondiale n'induit pas les mêmes conséquences en France et en Allemagne. Même si elle est vécue comme un traumatisme des deux côtés de la frontière, la guerre provoque quasiment un arrêt de la production scientifique française durant près de cinq ans (1940-1945) et une rupture générationnelle (chômage, STO, emprisonnement, Résistance). De l'autre côté, la chimie allemande continue d'être performante, même si elle est tournée vers un effort de guerre. Les chimistes, contrairement à beaucoup de physiciens, ne quittent pas l'Allemagne nazie. Après la capitulation du III^e Reich, l'Allemagne de l'Ouest est rapidement soutenue par les subsides états-uniens du Plan Marshall (1948). Comme les chimistes sont restés en poste durant toute la période, l'après-guerre ne conduit pas à un renouveau générationnel aussi marqué qu'en France.⁸⁶

La chimie du solide allemande d'après-guerre partage aussi avec la française un certain nombre de points communs : séparation d'avec la physique au niveau institutionnel ; même dualité entre une synthèse originale en chimie et l'étude de phénomènes pour le physicien – qui peut étudier le même composé durant des années ! –⁸⁷ ; primauté de la synthèse ; importance de la relation structure-propriétés en particulier à travers la liaison chimique dans un souci de prédiction ; rapport privilégié avec l'industrie – même si elle n'est pas vue comme une « *driving* » force [I Jansen, 2005, p. 5] –. L'industrie allemande, en particulier Siemens, ne développe pas de recherche fondamentale sur les matériaux. D'autre part, le mouvement contestataire des années 1960 infléchit les interactions entre université et industrie, qui étaient omniprésentes pour la chimie allemande. Simon suggère que l'intensité des relations université/industrie ne croît pas linéairement au cours du temps mais oscille comme un pendule dont l'amplitude et la fréquence d'oscillation sont liées aux conditions historiques.⁸⁸

Malgré ces convergences, les deux communautés nationales restent bien distinctes l'une de l'autre. Elles ne parlent pas les mêmes idiomes nationaux : l'allemand comme le français sont utilisés jusque tard dans les années 1970. La vivacité des langues vernaculaires

Hagenmuller, 2004, p. 13]. « En Allemagne, [...] ils ont eu du mal à franchir le pas pour l'étude de la propriété : c'est venu beaucoup plus tard, avec quinze ans de retard sur la France. » [I Ouvrard, 2006, p. 7].

⁸⁶ « *Before the World War II, many German physicists emigrated abroad and 27 of them became Nobel Prize Winner after the War. It means that the German physics was totally destroyed and restart from the beginning, [...]. On the contrary, the German chemistry felt proud to be strong.* » [I Simon, 2005, p. 1].

⁸⁷ « *It starts just with the objectives: the chemists want to make new stuffs, new compounds, phenomena and structures whereas the physicists like to understand and optimise the properties and phenomena. And therefore it may happen that groups of solid state physics work for many years just on one specific compound. Chemists never do that.* » [I Jansen, 2005, p. 5]. « PT: In France, the solid state physics (with Néel for instance) and chemistry were strongly separated. Was it the case in Germany too? – AS: *More or less yes.* » [I Simon, 2005, p. 5].

⁸⁸ « *Solid state chemistry is included in the study solid state compounds and metallurgy. [...] Actually it is not well designed, it is made of specific futures. I would say that it is the close connection between structure, chemical bonding and physical properties.* » [I Simon, 2005, p. 1]. « *My focus is on basic researches primarily, that is knowledge trouble research: trying to find new materials, the structures and understand the structure-properties relationships. Another component is to find applications to these materials, we put a quite big number of patents even if it was not our primary goal, it was just extracted from our primary researches.* » [I Jansen, 2005, p. 1]. « *During the 50s and 60s, solid state chemistry had relationships with the industries. In 1968, when the movement of protestation starts from Berkeley and spreads all over the world, the idea that research is not to buy became common. The students coming inside the professor's rooms discovered that sciences were linked with the industries and they decided they did not want this kind of relations. And yet, Klemm for many years was advising the industries, which in return gave him some money to perform his researches. Nowadays in Great-Britain, a big evaluation of sciences concluded that the relationships were too close, applications were the most important thing. I think that we can compare the relations between science and industry to a pendulum. These few examples show that the period of oscillation depends on historical periods and countries. In my opinion, this period is still much larger and should be as tiny as possible.* » [I Simon, 2005, p. 3].

en chimie contraste, pour les deux pays, avec la situation de la physique qui, rapidement après-guerre, se met à écrire en anglais.⁸⁹ Elle restreint probablement les échanges entre les chimies allemandes et françaises même si les Français vont lire les publications germanophones. Les communautés ne se construisent pas non plus sur les mêmes bases institutionnelles. En effet, contrairement au CNRS très dynamique dès les années 1950 pour soutenir la science française, la *Kaiser Wilhelm Gesellschaft* subit de plein fouet l'occupation par les forces alliées [Walker, 1997, p. 819]. Renommée *Max Planck Gesellschaft* (MPG), elle ne crée pas d'institut de chimie du solide avant 1970. La communauté allemande reste jusque-là essentiellement universitaire, c'est-à-dire que la chimie et la physique y sont bien distinctes (comme pour la France). Au cours des années 1970, en revanche, plusieurs centres « interdisciplinaires » (Stuttgart, Dresde) sont créés sous l'égide de la MPG afin de mêler physiciens et chimistes.⁹⁰ Les deux communautés nationales n'ont pas non plus les mêmes règles sociales. En Allemagne, lorsqu'un jeune chercheur passe son habilitation à diriger des recherches, il est obligé de changer de sujet par rapport à sa thèse – ce qui diversifie l'activité d'un laboratoire –, et par la suite, s'il veut devenir professeur, il doit changer d'université, ce qui rend automatique l'essaimage pour toutes les écoles de recherche.⁹¹ En France, le changement de sujet et l'essaimage ne sont pas des automatismes sociaux mais dépendent plus d'une volonté individuelle, celle du patron. De plus, les séminaires allemands sont réputés plus virulents et la complaisance reste souvent à la porte des discussions scientifiques – ce qui n'est pas le cas en France –. Chaque année, les professeurs de chimie du solide allemands se réunissent quelques jours dans les Alpes pour débattre des résultats de leurs laboratoires respectifs. Les discussions sont violentes entre pairs mais, centrées sur les résultats et non sur les personnes, la remise en question par la critique paraît plus efficace.⁹²

Malgré des échanges individuels nombreux, demeure une opacité historique à la traversée de la frontière (géographique, communautaire, nationale) : si l'on connaît parfois Collongues outre-Rhin, on se demande si c'est un élève de Hagenmuller ou pas !⁹³ Plus

⁸⁹ « *It means that the German physics was totally destroyed and restart from the beginning, and thus with English language.* » [I Simon, 2005, p. 1].

⁹⁰ « *The Max Planck Institutes did not establish solid-state centers until relatively recently, and they have been slow to recognize the need for interdisciplinarity.* » [I Goodenough, 2001, p. 19]. « *The Max-Planck-Institut was founded by people who had the feeling that there was a deficiency in German research. Physics and chemistry were not tied enough. They decided to found different societies with new possibilities compared with universities. The MPI of Stuttgart was created to focus researches on semi-conductors which were under-developed in Germany. Thus, in 1970, our laboratory aimed at studying semi-conductors by tying physics and chemistry.* » [I Simon, 2005, p. 2].

⁹¹ « *I stayed with Hoppe to make my "Habilitation". It used to be the classical carrier in Germany: you stayed with your former supervisor for your post-doc but you developed an independent field of research. I could not continue my Ph.D. subject and I went on a completely new research subject: an oxygen pressure work with new techniques. Then, from this position with Hoppe, I got directly in an inorganic chemistry chair. In the German system, you can never be promoted at the same place, you have to move.* » [I Jansen, 2005, p. 1].

⁹² « *jusqu'en 1975, je suis allé souvent en Allemagne où je peux dire que c'est là que j'ai été dressé pour les séminaires, parce que c'était des séminaires de choc, très intéressants, j'y ai beaucoup appris. Je suis allé à Giessen, au Max-Planck de Stuttgart, à Münster – les trois pôles où je suis allé le plus souvent – mais aussi à Tübingen, et finalement à Darmstadt.* » [p. 6]. « *Les Allemands discutent dur : les professeurs allemands de chimie du solide se réunissent une fois l'an, réservent un hôtel dans les Alpes, descendent en voiture de Düsseldorf, Hambourg, Tübingen... Chacun – les profs, ce ne sont pas les élèves qu'ils envoient au charbon – se met en face des collègues et raconte ce qu'il fait dans son laboratoire avec les questions brutales que l'on connaît. Je trouve que c'est bien mais on n'a pas ça en France, les questions brutales se transforment en guerre de personnes si on se permet des critiques.* » [I Galy, 2006, p. 28].

⁹³ « *I think that the connexions were not too close because of language. During the 60s, I was studying alkali metals and I think that Attero in Strasbourg did the same but we never exchanged results or articles. English as a common language came later, it only started during the 70s and even later. Marcel Sergent made beautiful works in Rennes but relations stayed hindered.* – PT: Did the German chemistry speak German late because it was a strong discipline in Germany? – AS: Maybe yes. *During the 70s, the physicists were speaking English*

précisément, les deux communautés ne correspondent pas aux mêmes répartitions sociales et cognitives. Première particularité allemande : Jansen précise qu'il existe une démarcation claire en Allemagne entre l'« *inorganic solid state chemistry* » et la « *physical solid state chemistry* ». La première, à laquelle il appartient, est principalement focalisée sur la synthèse de nouveaux composés. La seconde, plus centrée sur les propriétés physico-chimiques, est orientée vers les questions de réactivité et de non stœchiométrie. À cette seconde catégorie, il rattache Karl Wagner mais aussi Collongues pour ses travaux sur la non stœchiométrie et très probablement les cristallographes étudiant la croissance cristalline. Une histoire de la croissance cristalline, écrite par un cristallographe germanophone, cite d'ailleurs une seule contribution française venant de la chimie du solide : celle de Collongues et ses collaborateurs [Scheel, 1993, p. 32]. La distinction entre « *inorganic* » et « *physical solid state chemistry* » paraît totalement absconse pour un solidiste français.⁹⁴ Peut-être parce que, grâce au travail de la *Chaudronnerie* en particulier, la non stœchiométrie constitue un axe majeur de la chimie du solide française. L'une des conséquences essentielles est que l'*inorganic solid state chemist* allemand cherche surtout à synthétiser des solides propres, bien définis, stœchiométriques alors que le solidiste français se passionne pour la synthèse de solides non stœchiométriques.⁹⁵ Deuxième particularité : la distinction entre surface et volume, entre molécule et solide n'est pas aussi forte qu'en France. Si au cours des années cinquante, la chimie de l'état solide française flirtait avec la catalyse et avec les solides organiques (III.4.1), une spécialisation s'opère au cours des années soixante : la chimie du solide émergeante recentre son activité sur le solide minéral en volume (III.4.2) et la catalyse universitaire se construit comme une science indépendante autour de l'Institut de recherches sur la catalyse [Voillequin, 2005]. Ce n'est que très récemment que certains – comme Férey – ont à nouveau jeté des ponts entre chimie du solide et catalyse. En distinguant le volume d'un côté et la surface de l'autre (1960-1980), la chimie française pourrait constituer une exception dans le paysage occidental.⁹⁶ Au contraire, le solidiste allemand n'a aucun scrupule à affirmer la

without any problem whereas the chemists still spoke German. In 1990, when the Wall was broken, we discovered that most of chemists in East Europe were speaking German! » [I Simon, 2005, p. 3]. « PT: [...] do you know Robert Collongues for instance? – MJ: Yes, I know him: he wrote a book on non stoichiometry. – PT: That's true! – MJ: But I don't know whether he is a student of Hagemuller or whether he is independent. » [I Jansen, 2005, p. 6].

⁹⁴ « *I would like to add something: we were discussing the inorganic solid state chemistry but there is also a physical solid state chemistry with the study of diffusion and that's what Collongues is doing. The parallel school in Germany is the school of Karl Wagner who was dealing with diffusion and the basic theory.* – PT: What are the differences in Germany between inorganic and physical solid state chemistry? – MJ: *In this institute, we have a third department of chemistry dealing exactly with Karl Wagner was studying, transport phenomena. These people are not interested so much in new materials but they are investigating the physical properties of these materials, in particular the conductivities and the reactivity.* » [I Jansen, 2005, p. 6]. « PT: *En Allemagne, ils font une différence entre la physical solid state chemistry – qui a trait à l'étude des mécanismes internes au cours de la synthèse, des défauts, de la non stœchiométrie – et l'inorganic solid state chemistry – plus sur la synthèse de nouveaux matériaux –. Avez-vous déjà entendu parler de cette division ?* – JA : Non, ce n'est pas très clair pour moi. » [I Adam, 2006, p. 9]. « PT : *Y a-t-il des groupes qui travaillent sur les « réactions dans l'état solide » ?* – GO : Qu'est-ce que vous voulez dire par là ? Vous parlez de réactivité ? Quand on travaille sur l'intercalation, on ne fait que des réactions dans l'état solide. » [I Ouvrard, 2006, p. 7].

⁹⁵ « *If we compare the works of Mullen Buschbaum and Bernard Raveau. Buschbaum was interested in $LaCu_2O_4$, that is strictly stoichiometric compound with well-defined formulas. Raveau synthesised $La_{1-x}M_xCuO_4$, that is a mixing up of compounds. This example is typical of a great difference between French and German solid state chemistry: German chemists were interested in preparation of pure compounds whose formula was as well-defined as possible, on the contrary, French chemists were happy to find new compounds with non stoichiometric ratios.* » [I Simon, 2005, p. 2].

⁹⁶ Seuls trois pays au monde ont développé un institut de recherche indépendant sur la catalyse : la France (IRC), l'Union soviétique (Novossibirsk) et le Japon (Sapporo). Ailleurs, la catalyse universitaire ne s'est construite comme une science universitaire mais a été répartie entre chimie des surfaces, chimie du solide et chimie physique [informations fournies par Baptiste Voillequin].

continuité du champ scientifique de la molécule au solide en volume en passant par la surface.⁹⁷ Une telle continuité molécule-solide paraît absurde au cristalochimiste français (VIII.1.2.2).

Ainsi, les chimies du solide allemande et française sont construites sur des bases universitaires similaires (mandarinale et disciplinaire) malgré quelques frontières sociales et cognitives disjointes (distinction physique/inorganique, molécule/surface/volume). C'est surtout par leur façon de vivre des histoires différentes qu'elles se distinguent : lente progression séculaire au sein de la chimie inorganique pour l'une, révolution communautaire pour l'autre. De part et d'autre, on peut ignorer (en toute honnêteté) les travaux de son voisin à cause d'une barrière linguistique et d'un espace social disjoint. Si la France et l'Allemagne représentent les deux plus gros blocs nationaux de chimie du solide en Europe, les autres pays exhibent des particularités individuelles intéressantes. Je vais donc évoquer quelques cas nationaux de manière rapide (VIII.2.1.2) avant de poser la question d'une dynamique collective en chimie du solide à l'échelle européenne (VIII.2.1.3).

VIII.2.1.2. Quelques régionalismes en Europe de l'Ouest

L'Allemagne, par son poids international en chimie, a constitué autour d'elle une zone d'influence germanophone. Lors de la décennie d'ostracisme d'après-guerre, des communications de langue allemande sont présentées aux congrès européens de 1948 (Paris) et 1956 (Bruxelles) par des Suédois, des Danois ou des Suisses. Ceux-ci s'intéressent au cours des années 1950 aux réactions dans l'état solide et à la non stœchiométrie. Il serait probablement très intéressant de suivre la formation de cet ensemble de chimie germanophone autour de la puissante Allemagne avec l'Autriche, la Suisse, le Danemark et la Suède. Outre les villes allemandes, quelques centres de recherche ont sans doute eu une influence déterminante : Copenhague, Uppsala, Stockholm, Berne...

La Suède en particulier joue un rôle pionnier pour l'analyse structurale des solides minéraux au cours des années cinquante avec Hägg et Magnéli (III.4.1). Plus tard, à la fin des années soixante, c'est à Lund que Sten Andersson approfondit le savoir-faire de son patron de thèse, Magnéli, en le croisant avec celui de l'école structurale australienne en microscopie électronique (VI.2.1.2). Au laboratoire d'Oslo, Arne Kjekshus développe aussi une activité intéressante. Pays peu peuplé, la Suède doit faire des choix stratégiques et, à la fin du siècle, oriente sa politique scientifique vers les sciences du vivant en délaissant quelque peu les sciences du minéral. Mais, même au temps de sa splendeur, la communauté suédoise de chimie du solide reste de faible taille. C'est aussi le cas des Pays-Bas. Pour ces derniers, la chimie du solide universitaire (Groningen, Delft) est très probablement reliée aux efforts de recherche fondamentale déployés par la multinationale Philips (Eindhoven) durant le demi-siècle écoulé. La Belgique a une longue tradition cristallographique et de chimie des hautes températures. Amelinckx et son groupe interagissent avec les laboratoires de Flahaut et Hagenmuller (IV.1, IV.4).

Au sud de l'Europe, la zone d'influence n'est plus germanique. L'Italie s'oriente plutôt vers la chimie métallurgique que vers la chimie du solide minéral. L'Espagne vient à la chimie du solide à partir des années 1970 en formant une partie de ses futurs cadres en France : Bordeaux et Nantes sont les centres privilégiés. L'entrée de l'Espagne dans la

⁹⁷ « *Solid State Chemistry [...] spreads from the ionic compounds to the molecules. [...] It is both surfaces and bulk properties. Bulk properties are only one part, the one on which I concentrate. For instance, the solid state chemistry leads to the catalysis and properties of catalysts, which are surface and inner-surface properties. The porous solids are studied by Shut in Manheim and R. Schoedle in Berlin.* » [I Simon, 2005, p. 1].

Communauté économique européenne en 1986 donne un coup d'accélérateur à son développement scientifique.⁹⁸

Le Royaume-Uni – ou de manière plus vaste la Grande-Bretagne – offre une spécificité particulière en Europe. Ancien empire colonial comme la France, elle dispose de rapports privilégiés avec ses anciennes colonies réunies au sein du *Commonwealth of Nations* depuis 1931. Au cours de sa carrière de solidiste, JS Anderson ne cesse d'alterner les positions entre l'Angleterre et l'Australie : Harewell (GB, 1946-1954), Melbourne (A, 1954-1959), Teddington (GB, 1959-1963), Oxford (GB, 1963-1975), Aberystwyth (GB, 1975-1982), Canberra (A, 1982-1990). C'est avec Anderson que Hyde [1992] fait commencer la chimie du solide au Royaume-Uni, à la fin des années quarante. Mais, comme pour la France, le mouvement est plus complexe. Y prennent part la métallurgie d'entre-deux-guerres – en particulier Cecil Desch publiant *The Chemistry of Solids* (III.2.1.1) – et l'école de « chimie structurale » d'après-guerre (III.4.1.2).

La chimie du solide indienne, autour de la figure emblématique de C.N.R. Rao, se développe rapidement à Bangalore. Suite à une école d'hiver à Kampur en 1969, Rao édite un ouvrage collectif qui cherche à embrasser l'ensemble du champ : *Modern aspects of solid state chemistry* [Rao, 1970]. Il poursuit dans cette perspective fondatrice en éditant quinze ans plus tard avec Gopalakrishnan un ouvrage sur les *New directions in solid state chemistry* [Rao & Gopalakrishnan, 1986].⁹⁹ Cet ouvrage est publié par les presses universitaires de Cambridge, ce qui souligne les liens privilégiés entre l'Inde et le Royaume-Uni. De manière générale, les postdoc indiens venus à Nantes ont surpris Tournoux par leur « formation » et leurs « compétences » [I Tournoux, 2006, p. 11]. La cohésion du *Commonwealth* constitue sans doute un atout pour la science britannique.

Mais c'est surtout par sa position ambiguë en Europe qu'elle intrigue : île du Vieux Continent, le Royaume-Uni donne souvent l'impression aux autres États européens d'être tourné vers l'Atlantique et l'influence états-unienne. C'est l'image de la perfide Albion ou du Cheval de Troie des États-Unis. Aussi, la chimie du solide britannique semble peu étendue par rapport à celle de ses concurrentes directes, française et allemande. Diverses interprétations sont données : une chimie de coordination trop puissante qui aurait étouffé la chimie du solide émergente, un départ décalé dans le temps¹⁰⁰ – comme pour l'Espagne –, un

⁹⁸ « En fait la chimie minérale la plus avancée sur le plan structural et sur celui de la non stœchiométrie était sans doute l'École suédoise autour de Arne Magnéli » [I Pouchard, 2004, p. 2]. « Dans les autres pays, ce sont plus des groupes que des écoles : à Groningen aux Pays-Bas, à Uppsala en Suède pour la cristallographie, les Espagnols s'y sont mis mais plus tard... » [I Ouvrard, 2006, p. 7]. « *There were two other countries with a good solid state chemistry but smaller in size: the Netherlands and Sweden. In Delft, there were basic researches turned toward applications. Sweden used to make great chemistry but unfortunately they shifted toward life sciences after. [...] Spain was boosted by its entrance in European Union. There was no tradition of solid state chemistry and a lack of industry. Spanish students were trained in France by Rouxel for instance and now the laboratories of Barcelona and Valencia are very good.* » [I Jansen, 2005, p. 8]. « *Italy with a few groups was specialised in intermetallic compounds. So does Ukraine. Austria had strong groups. Russia was there too. Scandinavia had a long history of solid state chemistry. Sweden was strong during the 70s, with Magnéli and Rumkest but it is over because Sweden turned toward the biology. Spain on the contrary has a short history but the Spanish chemistry is strong nowadays.* » [I Simon, 2005, p. 4]. « Entre 1989 et 1993, six Espagnols font un séjour à Bordeaux soit presque autant que les Allemands (huit) [RA LCS, 1993, p. 397-398].

⁹⁹ Rao est « un homme qui a un sens aigu de la communication, c'est un homme intelligent. C'est un ami à moi, il est docteur *honoris causa* de notre université. – PT : *En Inde, il n'y a que lui ?* – PH : Oui, de très loin. C'est une espèce de demi-dieu, l'objet d'un véritable culte, il y a des rues qui portent son nom. » [I Hagenmuller, 2004, p. 14].

¹⁰⁰ « Dans les pays anglo-saxons, préexistait une forte culture de la chimie de coordination et de la chimie inorganique. Peut-être n'était-elle pas aussi forte en France, ce qui a permis l'éclosion de la chimie du solide française ? L'autre point positif de la France, c'est que les élèves de Hagenmuller se sont bien partagé les différents domaines. » [I Ouvrard, 2006, p. 7]. « *Great-Britain had a limited extent in this discipline.* » [I Simon,

développement calqué sur le modèle américain de la science des matériaux [Cahn, 2001]. La situation est d'autant plus troublante que dans le cas de la communauté des verres non conventionnels (chapitre VII), le Royaume-Uni disposait de forces égales à la France. Le cas britannique pourrait révéler bien des surprises par une comparaison avec les chimies du solide de ses deux principales rivales européennes : la France et l'Allemagne.

VIII.2.1.3. Y a-t-il une identité européenne en chimie du solide ?

Au delà des originalités nationales, il y a concomitance du projet politique européen (à partir de 1951) et de l'émergence – ou de la renaissance – de la chimie du solide en Europe (après-guerre). Dans les deux cas, l'axe franco-allemand constitue le ressort majeur de l'évolution, surtout durant les premières décennies. Faut-il y voir une coïncidence, un lien conjoncturel ou une corrélation forte ? Autre question, plus contemporaine : comment la politique scientifique européenne influe-t-elle aujourd'hui sur l'organisation de la recherche en chimie du solide ? Je ne chercherai pas ici à donner une vue exhaustive mais plutôt quelques éléments de réflexion.

Le projet européen, comme les plans d'équipement en France, n'est pas immédiatement axé sur les questions scientifiques. À partir de 1955, le CERN inaugure un ensemble de projets scientifiques et techniques paneuropéens [Hermann & al., 1987]. De manière générale, pour la deuxième moitié du vingtième siècle, seuls trois champs scientifiques bénéficient d'une politique européenne commune : « *nuclear and solid-state physics* », « *astronomy and space* » et « *molecular biology* » [Krige, 1997, p. 898]. La chimie du solide n'est donc pas en soi un objectif clair pour la politique européenne. C'est un indice fort en faveur d'une émergence indépendante des communautés nationales. Il est corroboré par l'impression d'un développement successif de la chimie du solide en Suède (avant 1950) puis en France (vers 1960) puis en Espagne (après 1970). Jusque tard dans les années 1970, les chimies allemandes et françaises continuent d'utiliser leur langue vernaculaire et sont peu enclines à écrire et parler anglais – contrairement aux physiciens –. Elles sont d'ailleurs lus dans le texte par leurs homologues anglophones. Ainsi, malgré l'explosion des conférences et des journaux internationaux à partir des années soixante (III.3.1), les mécanismes sociaux ne sont pas vraiment corrélés aux échelles nationales, européennes et internationales. Cette absence de corrélation explique comment Hagenmuller et Collongues peuvent jouer des rôles symétriques dans le récit légendaire national alors que Hagenmuller est infiniment plus connu que son rival au niveau mondial. En première analyse, il semble donc bien que l'émergence simultanée des chimies du solide européennes s'explique par des conditions conjoncturelles (croissance économique) et structurelles (structure académique forte) voisines et non par une volonté politique ou scientifique planifiée. Les cas de l'Espagne de Franco et du Royaume-Uni constituent des cas particuliers différents.

Le rapprochement des solidistes français et allemands se concrétise à la fin des années 1970 – au moment où la chimie du solide française atteint une période d'apogée – par l'organisation de la première *European Conference of Solid State Chemistry* à Strasbourg en 1978. Hagenmuller et Hoppe sont les deux principaux artisans de ce congrès qui réunit surtout Allemands et Français – Strasbourg constitue au passage un symbole de la réconciliation franco-allemande –. Par la suite, le cycle des conférences se perpétue tous les trois ans en intégrant de plus en plus de participants de nationalités différentes. Réunissant en moyenne

2005, p. 4]. « *The Great-Britain was less strong and had a younger solid state chemistry that is very promising.* » [I Jansen, 2005, p. 8].

quelque trois cents personnes, il constitue un acte fort de la fondation d'une communauté européenne basée sur la synthèse en chimie du solide. En effet, ces conférences sont dédiées à la chimie du solide minéral – au sens de l'*inorganic solid state chemistry* allemande (VIII.2.1.1.) –. Par opposition aux *European Conferences*, on organise tous les quatre ans, soit en Europe, soit aux États-Unis, des congrès internationaux « *Reactivity of solids* » tournés vers la *physical solid state chemistry*. Ces congrès ne font que perpétuer le cycle ouvert en 1948 par le colloque international « Réactions dans l'état solide », organisé à Paris par Chaudron et Bénard.¹⁰¹ En France, ces congrès ont migré de la chimie de l'état solide (1948) vers la chimie physique en une trentaine d'années, au moment où se construisait la chimie du solide. En Allemagne, ils sont liés à la catalyse.¹⁰²

La communauté européenne se dote par la suite d'un organe de presse, anglophone, à nouveau sous l'impulsion de Hagenmuller : l'*European Journal of Solid State and Inorganic Chemistry* fait suite en 1988 à la *Revue de chimie minérale*, fondée par Chrétien en 1964. Le triumvirat éditorial rassemble un solidiste français (Tournoux), un chimiste de coordination allemand (Roesky) et un minéraliste suisse (Kaldis). Victime de son succès, la revue est rachetée par l'éditeur américain Elsevier en 1998 et devient internationale. Elle change alors de nom pour *Solid State Science* dont la renommée équivaut à celle du *Journal of Solid State Chemistry* [I Tournoux, 2006, p. 14]. L'éphémère existence de la revue européenne – une décennie à peine – suggère que si le cadre européen a favorisé l'émergence de multiples communautés nationales grâce à des institutions académiques qui séparent la chimie de la physique, il n'a pas vraiment institué une discipline européenne. La structure européenne occupe une place intermédiaire – le mésoscopique est-il inconfortable ? – entre une organisation quotidienne microscopique (locale au sens du laboratoire et nationale au sens de la communauté) et un échange scientifique macroscopique (au niveau international des publications et des congrès). Cette tendance pourrait s'inverser si une politique scientifique européenne se mettait en place de manière spécifique pour ce champ scientifique. Le

¹⁰¹ « Pour les Allemands, nous étions trop tournés vers la physique, je pense, alors les Allemands organisaient des congrès pour les Allemands. Hoppe, par exemple, un des chefs de file de l'école allemande m'était hostile : quand j'ai organisé le congrès européen en 1978, je l'ai nommé président co-fondateur, il n'a plus rien dit. » [I Hagenmuller, 2004, p. 3]. « PT: Have you noticed big events such as conferences that could look like discipline foundations? – AS: There was the first European Conference of Solid State Chemistry in Strasbourg. It was co-organized by Hagenmuller and Hoppe. They were both friends and competitors. This conference was European but it was polarized between two main countries: France and Germany. The European conference still exists and gathers more than 300 people. » [I Simon, 2005, p. 6]. « PT: Do you think there were some events like international conferences that allowed solid state chemistry to affirm itself as an independent domain? – MJ: Yes, we have "European Solid State Chemistry" conferences, founded by Hagenmuller and Hoppe. It was a German and French society at the beginning that included all Europe soon after. It started around the beginning of the 1980s in Strasbourg. I just know we are at the number 10 now. The number 9 was in Stuttgart. The European community used to be the biggest one in the world. [...] then we have the reactivity on solids conference, more in the direction of Karl Wagner but an international one. » [I Jansen, 2005, p. 6]. La liste des lieux et dates des congrès de « *Reactivity of solids* » que j'ai pu reconstituer à partir des bases de données des bibliothèques nationales est la suivante : Paris (1, 1948), Amsterdam (4, 1960), Munich (5, 1964), Schenectady (6, 1968), Bristol (7, 1972), Cracovie (9, 1980), Dijon (10, 1984), Princeton (11, 1988), Madrid (12, 1992), Hamburg (13, 1996), Budapest (14, 2000). Depuis le premier congrès (1948), les actes sont publiés en langue anglaise : l'éditeur est new-yorkais pour les quatre premiers, londonien pour le cinquième.

¹⁰² Quand c'est au tour de la France de réorganiser le dixième congrès, en 1984, ce sont deux physico-chimistes de Dijon, Louis-Claude Dufour et Pierre Barret, qui s'en chargent. Le laboratoire de Barret collabore avec au moins un solidiste français, Rousset : « J'ai aussi créé des liens très forts à l'Université de Dijon avec le Laboratoire du Professeur Pierre Barret, qui était plus du côté chimie physique, cinétique, thermodynamique. À Dijon, j'ai travaillé avec Bernard Gillot pendant plus de vingt ans. Nous avons publié une centaine de papiers ensemble. » [I Rousset, 2006, p. 3] mais aucun solidiste français ne mentionne les congrès de réactivité des solides. Quand l'Allemagne organise une première fois la congrès en 1964, c'est un spécialiste de la catalyse hétérogène, G.-M. Schwab, qui s'en charge, à Munich.

quotidien du chercheur ne serait plus alors national mais européen, ce qui même aujourd'hui est loin d'être le cas. Dans quelles mesures la politique scientifique de l'Union européenne fin de siècle favorise-t-elle l'avènement d'une identité scientifique européenne ?

L'Union européenne (UE) intervient à trois niveaux dans la politique scientifique : stratégique, thématique, général. Premièrement, au cours de sa construction politique, l'Europe a institué et soutenu des organismes publics considérés comme stratégiques : CERN (1956), ESO (1964), ESA (1975)... Par leurs centres d'intérêt et leurs financements, ces organismes à vocation appliquée influencent la recherche universitaire (VII.3 ou LCTS) dès les années cinquante. L'influence décisionnelle du politique est d'autant plus forte que le domaine est considéré comme plus stratégique par le pouvoir politique [Krige, 1997, p. 915]. Ce n'est qu'après la crise énergétique de 1973 que la CEE se dote d'une Fondation européenne de la science, qui va orienter la politique commune en R&D sur les questions d'« énergie solaire », d'« utilisation de l'hydrogène », et de « céramique » conventionnelle [Hemily & Ozaas, 1979, p. 144]. Ce deuxième levier est plus conjoncturel : il s'agit de favoriser tel ou tel thème à telle ou telle époque. Les années 1980 marquent, semble-t-il, la transition d'un soutien à la recherche fondamentale sur contrats courts (mais récurrents) à une recherche finalisée à plus long terme. Aujourd'hui, les « réseaux d'excellence » pourraient s'inscrire dans un tissu de laboratoires européens afin de développer une dynamique interdisciplinaire. Les matériaux, les hybrides, les nano-matériaux constituent des thèmes typiques soutenus par l'UE avec des objectifs appliqués. Cette deuxième voie ne consiste pas à injecter de fortes sommes d'argent mais plutôt à fédérer, à « intégrer » divers laboratoires universitaires autour d'un objectif commun en lien avec l'industrie et les applications. Ces réseaux se heurtent aux logiques des institutions déjà en place – en particulier nationales –.¹⁰³ La troisième voie regroupe les autres types de financement, qui injectent l'argent européen ponctuellement dans la recherche publique sans projet à long terme, ni action concertée.

Quand on fait la somme des trois modes d'intervention, l'impact du financement européen sur les laboratoires de chimie du solide est faible : l'ICMCB ne touche que 5% de

¹⁰³ « Il y a une quinzaine d'années, l'Europe donnait encore des contrats pour la recherche fondamentale. Nous avons donc eu des contrats européens dans lesquels il y avait Bechgaard, les Portugais... une grosse activité pan-européenne là-dessus. Malheureusement cette période est un peu révolue » [I Jérôme, 2006, p. 14]. « JE : Je monte actuellement un « réseau d'excellence », basé sur les matériaux. Il s'appuie sur *High Brit and Ceramics* [...] Ce que j'essaie de proposer avec mes collègues – je ne suis pas le seul – est la coordination d'un réseau européen d'excellence [...] qui a pour but de faire l'intégration, c'est-à-dire de mener des actions durables. Jusqu'à aujourd'hui, les actions européennes étaient des actions à courte terme, basées plus sur la coopération que sur l'intégration. « Intégration » est le mot fort du système, l'intégration équivaut à la construction de l'Europe, si on veut construire l'Europe, il faut intégrer. Ça veut dire beaucoup de choses, ça veut dire déjà partager ses richesses, je suis parti du principe que « 1+1=3 », qu'il y a un effet de synergie, que si l'on partage ses richesses on ne s'appauvrit pas mais on devient plus riche. C'est un message qui n'est pas simple à faire passer, il s'agit d'un véritable changement de mentalités non seulement des personnes mais aussi des institutions. Il faut être complémentaire, mettre ensemble des gens de compétences différentes tout en tenant compte du facteur humain. Il faut savoir partager des équipements pour éviter les redondances. Je crois que l'on est condamné à faire ce genre de chose à l'échelle nationale mais aussi à l'échelle européenne. C'est un peu l'aventure dans laquelle je me lance, d'instituts virtuels – on ne va pas construire des bâtiments – avec des équipes de 7 pays qui vont travailler ensemble et échanger par les moyens de communication modernes et par des déplacements. Il s'agit de définir des équipes à géométries variables et extrêmement pluridisciplinaires sur les thèmes des matériaux hybrides organiques-inorganiques : on regroupe des biologistes, des physiciens, des gens qui font de la modélisation, de la chimie organique, de la chimie des polymères, de la chimie moléculaire. Nous essayons de proposer ces réseaux d'excellence – que nous coordonnons avec quelques personnes – à nos organismes de tutelle mais jusqu'à présent, il n'y a pas d'avancées des politiques. Ces réseaux doivent trouver leurs propres moyens pour fonctionner, le but est de ne pas obtenir des subsides de l'Europe, mais elles ont cependant d'un cadre politique pour les coordonner. Ces changements vont demander une génération au moins parce qu'il s'agit de démontrer qu'il y a un intérêt à travailler ensemble, une plus-value. L'industrie est bien sûr associée à notre réflexion mais elle n'est pas dans les réseaux. » [I Étourneau, 2005, p. 2].

subsidés européens pour son budget [I Étourneau, 2005, p. 14-15] ; l'argent européen représente 12% des ressources (hors salaire) du Laboratoire des verres et céramiques (Rennes) sur la période 1999-2002, soit l'équivalent de l'apport de la région Bretagne [RA LVC, 2002]. Par son mode d'intervention, l'Union européenne pose deux problèmes structurels aux acteurs, qu'ils soient chercheurs ou industriels. À force de ne pas assez fixer de priorités scientifiques et techniques, l'Union peut donner l'impression d'un saupoudrage inefficace (surtout vrai pour les deux dernières voies de financement). D'autre part, sont souvent critiquées les démarches administratives fastidieuses comme par exemple le contrôle scrupuleux des heures de travail. Une bureaucratie suspicieuse, trop lourde et trop encombrante, ralentit le travail scientifique. Ce n'est pas l'idée du « contrôle » qui est mise en doute mais plutôt la mise en place de rouages administratifs aux critères absurdes, inutiles et finalement inefficaces. Un compte rendu final des résultats suffirait, pensent les chercheurs, à juger de l'emploi de l'argent public.¹⁰⁴

Pourquoi la chimie du solide a pu être pensée comme une science européenne ? Les structures universitaires européennes ont probablement pesé lourd – en particulier par les ruptures physique/chimie et organique/minéral – dans la formation de chimies du solide nationales. La reconstruction de l'Europe après la Deuxième Guerre mondiale a aussi provoqué un élan et un gonflement spectaculaire des communautés : Trente Glorieuses en France, « miracle économique » en Allemagne de l'Ouest, etc. Chaque pays présente un développement propre qu'il s'agirait sans doute d'approfondir dans la perspective d'une histoire de la chimie du solide européenne. En première approximation, la construction politique de l'Europe (CECA, CEE, UE) a rendu possible l'émergence de communautés nationales en assurant des conditions favorables mais sans avoir particulièrement soutenu la discipline universitaire en tant que telle. Ce sont les acteurs nationaux sur l'axe franco-allemand qui, à partir de la fin des années 1970 seulement, se sont regroupés au sein de cycles de congrès puis en se dotant d'un éphémère organe de presse européen. En particulier, Hagenmuller multiplie les contacts des deux côtés du rideau de fer et s'impose comme le Français que tout le monde connaît en Europe mais aussi dans le monde.¹⁰⁵ Au fond, il semble que la chimie du solide européenne s'apparente plus à une juxtaposition de communautés nationales qu'à une méta-communauté européenne. La construction européenne ne commence à s'intéresser à une stratégie commune en R&D qu'au moment de la crise économique de 1973. À ce moment-là, les communautés nationales sont déjà bien en place. Ce n'est pas avant l'Acte unique de 1986 que la Communauté économique européenne décide d'inscrire la politique scientifique dans ses textes réglementaires [Laredo, 1997, p. 34]. Si la chimie du solide

¹⁰⁴ « PT : *Sentez-vous l'intervention d'une politique incitative de l'Union européenne ?* – PM : L'Union européenne a des velléités, elle essaie de lancer quelques grands axes par des appels à programme. Ça marche assez bien parce que c'est géré par des experts. Le premier problème de l'Union européenne est qu'elle n'est pas suffisamment sélective, il y a une dispersion des efforts mais c'est aussi vrai pour le CNRS ou Rhodia, il est difficile de choisir. Le deuxième problème, c'est le poids de la bureaucratie : le nombre de paperasses à écrire pour récolter au final la moitié de l'argent est impressionnant ! » [I Maestro, 2007, p. 13]. « je pense que les contrats européens, par leur administration stupidement tatillonne et lourde, peuvent conduire à la sclérose des meilleurs scientifiques parce qu'ils obligent à des trucs d'une stupidité confondante, il faut remplir des papiers pour une administration galopante où il faut justifier toutes les heures que font les gens, ça en devient grotesque. Il y a de l'argent mais c'est de l'argent gaspillé alors que si on mettait cet argent directement en demandant bien sûr qu'il y ait un rapport une fois l'an avec un contrat sur deux ans. Ce n'est pas la peine de remplir des pages, si ce n'était pas un *staff* de petits administratifs ignorants, je pense que les scientifiques se rendent compte très rapidement si quelque chose d'original a été fait. Je pense que plus ça va, plus c'est pire : ça va être un gaspillage complet de l'argent public européen. » [I Galy, 2006, p. 27].

¹⁰⁵ « En 1976, je suis allé à une conférence en Russie avec Coutures, Hagenmuller était très connu et son laboratoire était le laboratoire de référence. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 8].

européenne apparaît comme un espace intégré et fort, c'est surtout par opposition aux États-Unis, qui demeure le modèle idéologique ainsi que le concurrent scientifique à devancer.

VIII.2.2. États-Unis : du solide aux matériaux, une autre grille de lecture ?

VIII.2.2.1. Rang, structure et objectifs de la *Solid State Chemistry* états-unienne

Dans le monde occidental, le classement – se situer vis-à-vis des autres sur une échelle de valeur – est une activité courante et appréciée. Les communautés scientifiques aiment aussi s'attribuer les unes les autres des rangs. Pour la chimie du solide, l'Europe est réputée mener la danse par rapport aux États-Unis : l'Allemagne surtout par le lien synthèse-structure (1950-1965) (VIII.2.1.1) puis la France à travers la relation structure-propriétés (1960-1980) occupent le devant de la scène. Globalement, l'Europe présente une communauté dense, originale et productive, probablement leader mondial jusque dans les années 1980.¹⁰⁶ Qu'ils soient européens ou américains, les témoins s'entendent pour dire que la chimie du solide outre-Atlantique constitue une petite communauté par rapport à la taille de la science états-unienne. L'*American Chemical Society* (ACS) est largement dominée par les chimies moléculaire et de coordination – la situation semble d'ailleurs similaire au Royaume-Uni (VIII.2.1.2) –. Globalement, la chimie de coordination est essentiellement anglo-saxonne durant les années 1970.¹⁰⁷ Or, à l'ACS, la *Solid State Chemistry* ne constitue qu'une sous-section de la division chimie inorganique. Cet isolement conduit les solidistes américains à rechercher le contact de leurs homologues européens.¹⁰⁸ Si en valeur relative la taille de la communauté de chimie du solide états-unienne est faible, elle l'est aussi en comparaison avec

¹⁰⁶ « PT : De manière plus générale, que peut-on dire de la chimie du solide dans les autres pays ? – GO : Aux États-Unis, la chimie du solide est toujours loin derrière la France, même aujourd'hui. » [I Ouvrard, 2006, p. 7]. « Je dirais que dans les années 80, 85, 90, la chimie du solide française était la première au monde » [I Lucas, 2005, p. 9]. « *During the 1950s, 60s, and even 70s, the United-States were definitively far behind Europe* » [I Jansen, 2005, p. 7]. « Je pourrais dire des bêtises mais l'impression que j'ai en discutant avec des gens est qu'il y a encore d'excellents résultats en chimie du solide française. Mais on est loin du statut que la France avait dans les années 1970, 1980. À partir des années 1980, je pense qu'on a commencé à baisser de pied. » [I Galy, 2006, p. 27].

¹⁰⁷ « *if you compare with the size of the US, you discover that there are not so many places devoted to solid state chemistry there.* » [I Simon, 2005, p. 4]. « PT: That's because in the US solid state chemistry was a weak institution? – MJ: Yes, it is under-proportional compared to the whole community of scientists. » [I Jansen, 2005, p. 7]. « » BBV: But the solid-state community is small here. – JBG: Yes, the solid-state chemistry community is only now becoming prominent in America. When I came to Lincoln Laboratory in 1952, the chemistry departments in this country considered that solid-state chemistry was only an exercise in stamp collecting as the community consisted largely of structural chemists. » [I Goodenough, 2001, p. 19]. « La chimie de coordination était majoritairement anglo-saxonne » [I Galy, 2005, p. 25]. « Les gens de la chimie du solide américaine se demandaient où ils allaient publier, ils s'étaient rendu compte que l'*American Chemical Society* était un monstre énorme dans laquelle la chimie de coordination et la chimie moléculaire étaient dominantes, ils étaient des petits nains là-dedans, il y avait toujours une petite session pour la *solid state chemistry* mais si peu. [...] C'était encore pire en Angleterre où la chimie de coordination de Wilkinson écrasait toute la chimie anglaise. » [I Lucas, 2005, p. 9].

¹⁰⁸ « *they started also good solid state chemistry but oriented a little to Europe. They felt always rather somewhat isolated and they all had strong connections to Europe, to France as well as to Germany.* » [I Jansen, 2005, p. 7].

l'Europe : à la fin des années 1960, elle avoisine la taille de la seule communauté française. Le nombre de centres de recherche est donc bien plus restreint qu'en Europe.¹⁰⁹

Plus que par sa taille, c'est par la qualité de sa chimie du solide que l'Europe impressionne les États-Unis. L'Europe sert de référence dans l'organisation d'une chimie du solide efficace. Aussi les Américains enquêtent-ils pour savoir comment s'agence la recherche en Europe.¹¹⁰ Mais la chimie du solide européenne, centrée sur les départements de chimie inorganique des universités, ne correspond pas à la situation outre-Atlantique. Sur les campus américains, c'est la chimie de coordination qui écrase les départements d'inorganique. D'où la difficulté qu'ont les Européens à repérer la chimie du solide aux États-Unis au cours des années 1960 à 1980 : la situation leur paraît « confuse » tout simplement parce que les solidistes ne sont pas regroupés dans des laboratoires universitaires. À la fin des années 1960, les chimistes du solide sont principalement dans les laboratoires des multinationales américaines : Du Pont de Nemours, Exxon, IBM, General Electrics, *Bell Labs*... La puissance de la R&D industrielle s'est développée aux États-Unis durant l'entre-deux-guerres [Owens, 1997, p. 832-833]. Les principaux chimistes du solide américains n'intégreront massivement l'université qu'au tournant des années 1990 lorsque les multinationales américaines passeront d'une stratégie scientifique à une logique financière (VII.2.2.2).¹¹¹ En regard de ces laboratoires privés, des laboratoires publics – *Lincoln Laboratory* avec Goodenough –, militaires – *Naval Research Laboratory* –, et universitaires – Ames pour les terres rares (IV.2.), Ibers à *North Western* [I Ouvrard, 2006, p. 7] – développent aussi une chimie du solide de qualité. Comme pour la France et l'Allemagne, on trouve une génération de pionniers, celle qui use son énergie à organiser le paysage : Mike Sienko et Aaron Wald d'abord, mais aussi Neil Bartlett, Leroy Eyring, John Corbett... jouent le même rôle que Hagenmuller, Collongues ou Hoppe. Les « Bordelais » tiennent à placer John Goodenough au-dessus de la mêlée et le reconnaissent comme l'un des fondateurs de la discipline au niveau international par son approche théorique (simple) du solide. À la génération suivante, Art Sleight se démarque chez Bell Telephone par un réel talent de créateur de matériaux.¹¹²

¹⁰⁹ « Malgré les différences de taille des deux systèmes nationaux – les États-Unis, cinq fois plus peuplé – on remarque des chimies du solide similaires qui se développent vers la fin des années 60, début des années 70. La France avait alors largement le poids des États-Unis. » [I Lucas, 2005, p. 3]. « *In the United-States, there were some groups in industrial companies like Bell, and in universities like Ames with Corbett. Nevertheless, if you compare with the size of the US, you discover that there are not so many places devoted to solid state chemistry there.* » [I Simon, 2005, p. 4].

¹¹⁰ « *During the 70s, the United-States asked me to write a letter to expose the situation of German solid state chemistry and to draw a parallel with the French one. The US would like to know the organisation in these two first countries in order to organise themselves. In France, the solid state chemistry had much started during the 70s.* » [I Simon, 2005, p. 1].

¹¹¹ « Il est difficile d'évaluer précisément la chimie du solide américaine parce qu'elle est beaucoup plus confuse » [p. 9]. « Pour les États-Unis, je situe l'apparition de la chimie du solide chez Du Pont de Nemours à la fin des années soixante : il y avait une vraie école de chimie du solide qui fabriquait vraiment de nouveaux produits. [...] il y avait pourtant une petite activité de chimie du solide fortement couplée avec la physique au sein des laboratoires industriels américains : Du Pont de Nemours, Exxon, IBM, *Bell Labs*... [...] La grosse différence, c'est que les meilleurs scientifiques américains travaillaient au sein d'organismes privés – IBM, General Electrics, Du Pont... – et pas dans les universités ou au CNRS comme en France. Jusqu'en 1990 – j'étais alors consultant chez Du Pont depuis près de dix ans – ces groupes industriels étaient réellement *managés* par des scientifiques de très haut niveau. [p. 2-3]. « J'ai vu les très bons chercheurs du solide américains comme Sleight passer à l'université. Les universités américaines – MIT, Harvard, Berkeley, Stanford... – se sont ramassés les tout bons des boîtes privées parce que les types ont senti que c'était fini, qu'il n'y aurait plus de recherche interne. » [I Lucas, 2005, p. 14].

¹¹² « J'irais plus loin en traçant un parallèle de développement entre la France et les États-Unis. Il y avait des patrons américains de la même génération que Collongues et Hagenmuller : Mike Sienko, Aaron Wald – que je ne retiendrais pas – qui n'ont pas trouvé grand chose mais qui ont eu la même intuition et qui ont formé des gens créatifs, de la même génération que moi. Ce sont ces derniers qui sont responsables du décollage de la chimie du

Le positionnement de la chimie du solide états-unienne au sein des entreprises industrielles a trois conséquences majeures qui la distinguent de son homologue européenne : la première a trait aux moyens matériels, la deuxième à la méthode, la dernière concerne la finalité. Les laboratoires de recherche des multinationales – au moins jusque vers 1990 – disposent de « moyens formidables ». Qu'ils soient financiers ou instrumentaux, ils dépassent largement ceux de leurs collègues européens de l'université.¹¹³ La synthèse du diamant synthétique – que Moissan s'était efforcé de réaliser –, la cristallogénèse du germanium et du silicium, la maîtrise des silanes – que Pouchard n'avait pu poursuivre pendant sa thèse (IV.4.1) – sont finalement réalisées par des équipes au sein de multinationales. Deuxième conséquence : au quotidien, physiciens, ingénieurs et chimistes se côtoient au sein des mêmes laboratoires, ce qui conduit ces derniers à se préoccuper davantage de propriétés physiques et moins de synthèses originales que leurs homologues européens. Cette tendance était déjà présente au congrès de Bordeaux, en 1964 (IV.4.1.2). Généralement, ce sont les physiciens qui mènent la barque, les chimistes étant seulement pourvoyeurs de monocristaux. Une telle organisation a été adoptée par les Laboratoires Bell où, dès les années 1940, la physique du solide dirige les recherches de physico-chimie, chimie ou métallurgie [Hoddeson, 1977]. L'attitude de Goodenough, qui essaie d'inverser la tendance en mettant les physiciens à la disposition des chimistes, est extrêmement rare. Par conséquent, les solidistes américains sont souvent assimilés à des physiciens par les Européens.¹¹⁴ À ce titre, la mise en évidence de la supraconductivité des phases de Chevrel par l'équipe Matthias aux *Bell Labs* est tout à fait symptomatique de la différence entre Europe et États-Unis : synthèse de solides originaux pour les premiers alors que les seconds caractérisent, grâce à des moyens importants, les solides re-synthétisés. Ceux-ci publient dans *Science*, ceux-là dans *Journal of Solid State Sciences* (VII.1.1). Et en effet, les chercheurs des multinationales américaines procèdent à une veille scientifique sur les solides européens. Les publications françaises et allemandes sont lues attentivement, même dans la langue originale.¹¹⁵ Le point fort des Européens par rapport

solide américaine vers la fin des années 60. Le grand nom qu'il faut retenir, celui qui est à mon avis le plus créatif de sa génération : Art Sleight. C'était un innovateur formidable chez Du Pont où il travaillait. » [I Lucas, 2005, p. 2-3]. « À l'époque où j'ai développé la chimie du solide en France, il n'y avait pas grand-chose aux États-Unis mis à part Goodenough, il y avait aussi Aaron Wald et ses élèves et Sienko qui a découvert les bronzes de vanadium » [p. 11]. « L'homme à retenir aux Etats-Unis est John Goodenough. » [I Hagenmuller, 2004, p. 12]. « Grâce à John Goodenough, nous pouvons désormais discuter avec les physiciens » [I Pouchard, 2004, p. 33].

¹¹³ « C'était vraiment une échelle qui dépassait la France. Quand j'ai vu les moyens formidables qui étaient mis en œuvre pour fabriquer du diamant synthétique, les tailles des presses, j'ai compris qu'on ne pouvait pas rivaliser dans ce domaine-là. Les *Bell Labs* étudiaient activement la microélectronique, d'autres industries développaient des lasers, l'optique appliquée, des capteurs, des nouveaux matériaux comme les molybdates... » [I Lucas, 2005, p. 3].

¹¹⁴ « il y avait pourtant une petite activité de chimie du solide fortement couplée avec la physique au sein des laboratoires industriels américains [...] Dans ces structures, la chimie était alors le plus souvent sous domination de la physique, Cotton était le grand pont de la chimie inorganique de l'époque. Il manquait réellement une synthèse chimique au sein des *Materials Science*, comme la pratiquait Collongues par exemple. L'invention du laser est sans doute plus due à Maiman qui a synthétisé un monocristal de rubis qu'aux théoriciens qui avaient développé l'idée du pompage optique. » [I Lucas, 2005, p. 3]. « dans l'ensemble, ce sont plutôt des physiciens. » [I Ouvrard, 2006, p. 7]. « *It was only in a few industrial interdisciplinary laboratories like the Bell Telephone Laboratories and IBM that the solid-state chemists were interacting with engineers and physicists. However, even there they served the physicists and engineers by providing them with single crystals. When I took charge of the small ceramics facility at Lincoln Laboratory, I said to myself that I wanted to make the physicist serve the chemist rather than the other way around, so I said to my people, "We have got to be the dog, not the tail; we will let the physicists be the tail, not the other way around." I suppose it was that attitude that made Oxford accept me as a chemist.* » [I Goodenough, 2001, p. 19].

¹¹⁵ « avant qu'on ne se mette à l'anglais, les Américains, quand ça les intéressait, lisaient les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, qui étaient écrits en français. » [I Galy, 2006, p. 25].

à leurs rivaux américains est incontestablement l'originalité de la synthèse. Aux États-Unis, la synthèse est une activité qui est un peu « démodée » et qui paraît ennuyeuse aux chimistes, jusqu'aux années 1980.¹¹⁶ Ceci conduit à la troisième conséquence : les industriels sont plus intéressés par les applications que les universitaires. En d'autres termes, si la chimie du solide européenne est aussi séduisante c'est parce qu'elle est plus « fondamentale » – elle peut se permettre d'être originale en synthèse – alors que les Américains recherchent plus expressément un solide mis en forme, un matériau appliqué.¹¹⁷ Si les Européens sont forts en cuisine, les Américains s'occupent plus de procédés pour lesquels ils sont devenus experts. De fait, en étant placée au cœur de l'industrie des matériaux, la *Solid State Chemistry* américaine constitue l'un des rouages de la *Materials Science and Engineering* dans laquelle elle occupe une place primordiale mais peu visible.

VIII.2.2.2. Quel positionnement de la *Solid State Chemistry* vis-à-vis de la *Materials Science and Engineering* ?

Quand on questionne les observateurs européens (français et allemands) à propos de la chimie du solide aux États-Unis, ceux-ci évoquent souvent l'importance de la *Materials Science and Engineering* (MSE), comme si la chimie du solide était dépendante d'elle. La MSE n'incorpore pas la chimie du solide comme sous-discipline mais elle la détermine partiellement. C'est vers 1960 que la MSE a émergé en tant que discipline universitaire par agrégation de domaines connexes – physique du solide, électronique, métallurgie, génies mécanique, chimique et électrique – à la conjonction d'organismes gouvernementaux (à vocation appliquée) et de laboratoires universitaires [Bensaude-Vincent, 2001, p. 223, 239]. Au niveau épistémologique, on peut recenser trois principales sources d'inspiration : l'atome dans le cristal à travers la diffraction des rayons X ; la notion de phase thermodynamique avec les concepts d'équilibre, de métastabilité et de non stœchiométrie ; la microstructure associée aux propriétés mécaniques [Cahn, 2001, chapitre III]. Les États-Unis portent à tel point l'originalité de ce projet interdisciplinaire,¹¹⁸ que certains considèrent que les autres pays occidentaux ont eu une décennie de retard par rapport à eux [Cahn, 2001, chapitre I]. La *Materials Research Society*, créée en 1973 aux États-Unis, assure l'organisation bi-annuelle de conférences gigantesques au printemps et à l'automne, qui réunissent par thèmes de nombreux chercheurs issus de communautés différentes. La focalisation sur les applications y est plus importante que lors des *European Conferences of Solid State Chemistry*.¹¹⁹ Deux caractéristiques fortes dynamisent, guident et redéfinissent en permanence la MSE : une instrumentation multiple et un caractère disciplinaire métissé. L'aspect multiforme sous-tend une identité prégnante, basée sur la compréhension de situations réelles complexes [Bensaude-Vincent, 2001, p. 239].

¹¹⁶ Franck Di Salvo, l'un des solidistes américains les plus en vue des années quatre-vingt, travaillant aux *Bell Laboratories*, précise son point de vue dans un article général [Di Salvo, 1985] : « *with few exceptions, the new compounds were synthesized originally in Europe. This is no surprise. Inorganic chemistry, especially solid state chemistry, is a strong healthy science in France and in Germany. In the United States, synthesis of solid state compounds has been considered out of date and a little dull.* »

¹¹⁷ « *I know from people of Bell Labs that many of them just read the papers from the French or German colleagues and looked what could be interesting for some applications and then they re-synthesised them and made products or found ideas for applications.* » [I Jansen, 2005, p. 7].

¹¹⁸ « les matériaux sont un peu une création américaine, une dynamique américaine » [I Friedel, 2001, p. 4].

¹¹⁹ « *there was from the beginning a much stronger focus on the materials research in the US and the Materials Research Society of the US is a huge one. There are two meetings per year: Fall and Spring meetings, where a huge crowd of people coming. This is quite different. In the former times, I think that the materials researches toward applications were much stronger in the US, and the basic researches stronger in Europe.* » [I Jansen, 2005, p. 7]

Qu'en est-il si on la compare à la chimie du solide ? Dans sa version européenne – structurellement éloignée de la MSE –, la chimie du solide entretient le même rapport avec l'instrumentation : partie de la diffraction des rayons X comme méthode de référence (chapitre IV), elle s'est enrichie de nouveaux moyens de caractérisation à partir de la fin des années 1960 (VI.2.1). En revanche, elle s'est organisée autour d'une communauté disciplinaire bien définie (chapitre III). Si elle a cédé aux tentations interdisciplinaires, ce n'est que récemment – à partir des années 1990 – et en de rares occasions – les instituts de matériaux – lui préférant une approche pluridisciplinaire (VI.3.1). En France, l'attrait du matériau réel (défauts, non stœchiométrie) a poussé la chimie du solide vers la résolution pratique de situations réelles complexes (chapitre VII). Comment situer la chimie du solide états-unienne entre ces deux tendances, l'une multidisciplinaire, l'autre interdisciplinaire ?

Conséquence importante du caractère hybride de la MSE : ses frontières disciplinaires ne cessent de se déplacer, de se recomposer, absorbant ou excluant les divers domaines à un rythme soutenu. Ce faisant, elle accueille des gens de formation et de métier très différents : ingénieurs, physiciens, chimistes, métallurgistes. Cette multiplicité des trajectoires professionnelles distingue la MSE de la physique ou de la chimie du solide états-uniennes, où traditionnellement la formation universitaire décide d'une carrière. Ainsi, la MSE ne peut être considérée comme la juxtaposition d'une physique et d'une chimie du solide européennes.¹²⁰ Néanmoins la grille de lecture peut être faussée : ainsi, Goodenough, considéré comme physicien au *Lincoln Laboratory* (US), obtient la chaire de chimie inorganique d'Oxford en 1975. La MSE tend donc à rendre la chimie du solide plus perméable aux États-Unis qu'en Europe. Car, la chimie du solide états-unienne se trouve au contact direct de la MSE,¹²¹ soit lorsqu'un solidiste travaille dans un institut de matériaux, soit de manière plus collective entre les deux communautés. Un chimiste a alors une tendance culturelle à considérer *de facto* le solide comme un matériau. À partir de ce décalage culturel, les acceptions du mot « matériau » peuvent recouvrir des réalités différentes des deux côtés de l'Atlantique. « *Materials* » renvoie directement à la MSE, en particulier au tétraèdre « *synthesis/processing* », « *structure/composition* », « *properties* » et « *performance* » [Bensaude-Vincent, 2001, p. 228]. Or, ce tétraèdre envisage la matière comme une entité utile. Au contraire, en France, les deux mots, « solide » et « matériau », restent encore largement usités. À la fin des années cinquante, le mot « solide » renvoie à l'état physique, gage de scientificité au moment où la chimie du solide désire convaincre de sa légitimité (chapitre III). Par la suite, à partir des années 1970, lorsque l'on utilise le mot « matériau », ceci ne signifie pas pour autant que l'on s'attèle à une recherche appliquée mais suggère que l'application est un résultat potentiel de la recherche fondamentale. Il existe ainsi pour le solide français tout un dégradé de significations de la matière fondamentale (« solide ») à la matière potentiellement appliquée (« matériau »). L'universitaire français ne va jamais jusqu'à l'application même lorsqu'il en est très proche (chapitre VII). Il tient en partie son originalité créatrice de cette possibilité d'être loin de l'application.¹²²

¹²⁰ « *Materials science, as the new name implied, was not identical with solid-state physics. The search for funding, identity, and status led to constant border shifts among physicists, chemists, metallurgists, and engineers, so that even the chain of grand new laboratories did not guarantee a settled position to solid-state physics.* » [Weart, 1992, p. 649]. « PT: So the equivalent of the US materials science is the sum of solid state chemistry and physics? – MJ: *The materials chemistry research in the US is bigger and moreover the engineering part and the science part are joined. In Germany, the engineers are separated from us. Both parts work very close inside the same institutes like in the MIT.* » [I Jansen, 2005, p. 7].

¹²¹ « Aux États-Unis, la chimie du solide est l'interlocuteur traditionnel pour les matériaux alors qu'en France c'était beaucoup plus disjoint en France, il y avait une dichotomie importante. » [I Vivien, 2004, p. 18].

¹²² « je ne pense pas que la notion de matériaux ait le même sens actuellement en France et aux USA. » [I Friedel, 2001, p. 3]. « Il y a aussi en France toute la palette continue allant de la chimie du solide pure et dure à

Par conséquent, la chimie du solide états-unienne se montre plus préoccupée de recherche appliquée que de recherche fondamentale par rapport à son homologue européen.¹²³ Sa position institutionnelle pousse en ce sens que ce soit dans des sociétés industrielles ou dans les universités, où, à partir de 1982, le *Bayh Dole Act* favorise le dépôt de brevets par les universitaires. Du fait de l'interpénétration plus grande des sphères industrielles et universitaires, un universitaire fondamentaliste américain, comme Goodenough, emploie le même langage qu'un industriel français, comme Maestro, pour définir les propriétés d'un solide comme « intrinsèques » et « extrinsèques ».¹²⁴ Cette conception envisage la matière dans une dualité fondamental-appliqué. Si les solidistes américains se sentent plus proches du matériau – parce que plus proches de la MSE – que leurs homologues européens, la situation est différente pour les industriels. Qu'ils soient européens ou américains, leur but est le même : commercialiser des matériaux appliqués.¹²⁵

Sans étude plus précise des communautés de *Materials Science and Engineering* et de *Solid State Chemistry* aux États-Unis, il convient d'être prudent. Si ma grille de lecture, centrée sur la communauté universitaire et l'appartenance disciplinaire, convient globalement pour l'Europe, elle est moins pertinente outre-Atlantique où l'importance de la *Materials Science and Engineering*, entité hybride, rend difficile une évaluation de la communauté *Solid State Chemistry*. Quoiqu'il en soit, celle-ci se trouve imbriquée à celle-là : pour cette raison, elle s'est construite sur la notion de « *materials* » qui la rend plus sensible aux procédés, propriétés physiques et applications et moins à l'originalité en synthèse, qui a fait la force du Vieux continent.

la science des matériaux pure et dure. Les deux motivations sont cependant différentes : savoir et comprendre l'origine d'un phénomène et créer des corps nouveaux ou améliorés pour répondre à une propriété, dans le premier cas, aboutir à un objet de propriétés optimisées, notamment par leur procédé de mise en forme, dans le second cas. » [I Pouchard, 2004, p. 33]. « AH : If I may make a comparison with Stanley Whittingham here. You were working on some of the same materials, you were using some of the same tools (NMR), but you were asking very different questions, right? – HA: Yes, that is true. I was not at all involved in the application. For two reasons: French chemists were interested in materials and did not look to the application. And chemists were between me and the application, so I had no contact with attitudes such as Whittingham's. I was very happy working on the solid state physics problems. » [I Arribart, 2001, p. 2]. « En France, il y a eu beaucoup de recherche fondamentale. L'originalité française n'est pas dans la collaboration avec l'industrie mais dans l'approche physique, dans la collaboration entre chimistes et physiciens du solide. Je défends l'approche française. Si les gens avaient été très proches du milieu industriel, je ne crois pas qu'on aurait été aussi forts en chimie du solide. » [I Boilot, 2001, p. 4].

¹²³ « De manière très globale, je dirais que les États-Unis sont plus de culture matériaux avec un regard plus important pour les propriétés d'application. Ceci est vrai même pour la recherche académique américaine, elle est plus appliquée et les Français sont trop souvent restés en amont. » [I Maestro, 2007, p. 14]. « Les deux écoles [françaises] sont tournées vers la science fondamentale plus que vers les applications. C'est totalement différent de l'approche science des matériaux aux USA. Elle n'existe pas en France. L'approche *Materials Science* est plus tournée vers les applications. » [I Boilot, 2001, p. 4].

¹²⁴ « I would also distinguish between the extrinsic and intrinsic properties of materials. » [I Goodenough, 2001, p. 22]. « La science des matériaux suit les composés depuis leur conception, tout ce qui est cristallographie et relation structure-propriétés, c'est-à-dire la façon dont l'arrangement des atomes induit la propriété intrinsèque du matériau, jusqu'aux propriétés extrinsèques des matériaux. » [I Maestro, 2007, p. 2].

¹²⁵ « PT : Et si on compare les styles des industriels anglo-saxons et français ? – PM : Je pense que tous les industriels ont le même but : mettre un produit sur le marché et qu'ils sont donc tous tournés vers les applications. De ce point de vue là, il n'y a pas de différence. » [I Maestro, 2007, p. 14]

VIII.2.3. Vous avez dit « universalité » ? localités, effets de mode et individualités.

La chimie du solide est une discipline qui s'est développée de diverses manières selon les pays. Fortement implantée en Europe d'abord (je ne discute pas du cas du bloc soviétique), elle s'est étoffée par la suite aux États-Unis et au Japon. Durant les années 1960 et 1970, l'Europe, en particulier la France et l'Allemagne, constitue le foyer de formation par excellence pour les thésards et postdoc japonais, indiens ou de manière plus large asiatiques et africains. Une étude mondiale plus détaillée serait évidemment nécessaire dans la mesure où les grilles de lecture sont influencées par les contextes nationaux. Au Japon, par exemple, chimie et physique du solide pourraient être plus intégrées à la science des matériaux qu'elles ne le sont en Europe.¹²⁶ Si l'existence de congrès internationaux – *European Conference of Solid State Chemistry, Reactivity of Solids, Gordon Conferences* – et de revues internationales anglophones à partir des années 1960 donnent l'image d'un universalisme homogène, les circonstances régionales, nationales et supranationales déterminent profondément les développements sociaux et cognitifs des sciences expérimentales.

Pour les thèmes de recherche, les applications ou les instruments que l'on privilégie, l'intérêt peut varier énormément d'un pays à l'autre, d'une décennie à la suivante. Les terres rares par exemple n'intéressent pas de la même façon les solidistes de tous les pays. Stratégiques aux États-Unis à partir du projet Manhattan, en Union soviétique par contrecoup, intégrées à la chimie du solide française grâce à Urbain puis Trombe, elles sont très peu étudiées en Allemagne ou en Grande-Bretagne. Suivant la montée en puissance de la chimie du solide japonaise puis de la science chinoise, ces éléments chimiques sont aujourd'hui beaucoup étudiés dans ces deux pays, désormais leaders mondiaux.¹²⁷ Au contraire, les « piles à combustible » sont d'abord peu soutenues en France par les pouvoirs publics français par rapport à l'Amérique ou au Japon.¹²⁸ Aujourd'hui encore, elles sont peu prises en compte en France pour résoudre les problèmes énergétiques. Une technique comme la microscopie électronique est incontournable pour l'école de cristallographie australienne et suédoise dès la fin des années 1960 (VI.2.1.2) puis se trouve activement utilisée au Japon – grand fabricant de microscopes –, en particulier par Sumo Ijima. Au contraire, les chimistes français ne se

¹²⁶ « Au Japon, [la science des matériaux] est aussi très puissante et davantage dominée par la physique. » [I Pouchard, 2004, p. 33]. « Au Japon, il y a entre 300 et 400 chercheurs, chimistes et physiciens confondus en une coopération étroite dans les mêmes instituts parce que la distinction entre physique et chimie là-bas n'est pas du tout la même qu'ici. J'ai vraiment l'impression en France que nous sommes revenus au système d'autrefois, avec les physiciens d'un côté, les chimistes de l'autre, j'ai l'impression qu'on pourrait faire beaucoup mieux en matière de coopération. » [I Jérôme, 2006, p. 12].

¹²⁷ « PT : *Quels sont les pays qui ont compté dans votre domaine ?* – PC : Par ordre d'importance, je dirais les États-Unis puis la France, (avec la Belgique, la Suisse, l'Espagne), en ce moment, la Chine et le Japon sont très performants. Le Brésil et l'URSS en son temps, ont fait des choses intéressantes aussi. – PT : *Vous n'incluez pas les Britanniques ni les Allemands ?* - PC : Non, ils n'étaient pas très intéressés par les terres rares. » [p. 15] « PT : *Est-ce que vous étiez confronté à des laboratoires privés comme les Bell Labs par exemple ?* – PC : Les Bell Labs ne s'occupaient pas vraiment de ces choses-là. Il y avait RCA au début qui avait inventé la télévision couleur et Philips aussi en Hollande. » [I Caro, 2005, p. 23]. « J'allais aux Congrès des terres rares : il y avait alternativement sur 3 ans un congrès en Europe, un aux États-Unis et un dans les autres pays : Brésil, Japon, Australie. » [I Antic-Fidancev, 2006, p. 9].

¹²⁸ « Depuis le début des années quatre-vingt, je défends l'idée contre vents et marées que les piles à combustible ont un grand avenir. La France était le pays le moins avancé dans ce domaine par rapport à des pays comme les États-Unis, le Canada, le Japon qui ont compris très vite qu'il fallait développer cette technologie. Le Japon a très tôt développé des piles particulières, des piles à acide phosphorique et des piles à carbonates fondus, qui sont de grosses machines posant beaucoup de problèmes de corrosion et qui n'auront sans doute pas un très grand avenir industriel dans le contexte énergétique actuel. » [I Pouchard, 2004, p. 26].

passionnent pas vraiment pour cette technique coûteuse à part dans quelques laboratoires (Bellevue, Caen, Toulouse), et ce malgré un laboratoire de physique pionnier pour la microscopie électronique dès les années 1950 – le Laboratoire d'optique électronique (LOE) à Toulouse –.¹²⁹

Si les intérêts pour tel ou tel thème, tel ou tel instrument sont partiellement déterminés par des politiques scientifiques nationales, l'étude de tel ou tel composé dépend aussi des époques. Ainsi, les bronzes de vanadium qui enthousiasment les solidistes du monde entier au cours des années 1960 (IV.4.1.4) laissent de marbre leurs homologues de la physique. À la fin des années 1990, les oxydes de vanadium sont relancés par des physiciens japonais. Ils constituent alors un matériau permettant de tester les nouvelles théories physiques prenant en compte le couplage entre électrons. Suivant leurs collègues japonais, les physiciens français s'y intéressent alors que tous les efforts des solidistes bordelais ne les avaient guère convaincus trois décennies plus tôt.¹³⁰

L'étude du cas français a mis en évidence l'importance des leaders individuels : Hagenmuller et Collongues sont les personnages principaux de la légende communautaire. Au niveau international aussi, le champ scientifique a été dominé par quelques individus dont l'aura fascine et oriente partiellement le reste de la communauté. Ainsi, Klemm, Goodenough, Anderson ou Wadsley (malgré sa mort précoce) apparaissent comme des figures dominantes, incontournables pour comprendre l'évolution historique à l'échelle internationale.¹³¹ Leur histoire est à écrire en évitant les pièges de l'hagiographie. Situations institutionnelles, renommée, prestige, récompenses... sont autant de signes apparents du mandarinat. Cette position préminente que le groupe accorde à quelques individus "élus" pose la question de l'évaluation scientifique de leur travail.

¹²⁹ « Il faut dire que certains laboratoires français ont été très tard à se mettre à la microscopie électronique. Les laboratoires comme Bordeaux ou Nantes l'ont connue très tard. Au contraire, il y a eu un certain nombre de laboratoires pionniers comme Toulouse ou Caen ou même nous mais réservé au problème des terres rares. » [I Caro, 2005, p. 5]. « Après il y a eu plein de gens qui ont fait de la microscopie électronique à très haute résolution comme Ijima, ça a démarré dans les années 70, il y a eu plein d'images magnifiques où on voyait les colonnes atomiques » [p. 4]. « Le [Laboratoire d'optique électronique] a connu son heure de gloire internationale, les Japonais sont venus et, d'ailleurs je pense, ont profité de l'ouverture qu'il y avait – Dupouy ne fermait pas les portes – pour réaliser pas mal de transferts de technologie vers le Japon sans rien demander à personne. » [I Galy, 2006, p. 14].

¹³⁰ « Ce qui est amusant, c'est que tous les composés que j'ai publiés, dans ces années [1960] avec mon équipe dans le domaine des oxydes à valence mixte du vanadium, ont été repris ces dix dernières années, par les Japonais qui sont retombés dessus. Ils ont refait quasiment toutes les phases qui se sont avérées présenter des propriétés magnétiques tout à fait exceptionnelles. On est tombé sur toute la chimie des électrons fortement corrélés parce qu'il y a du vanadium IV avec des propriétés magnétiques tout à fait intéressantes. À ce moment-là, les physiciens français ont suivi, Patrice Millet qui travaillait avec moi, ici, au CEMES, a développé beaucoup de contacts avec des physiciens de Marseille, de Suisse, d'Allemagne... » [I Galy, 2006, p. 6]. *PT : J'ai un peu l'impression que physiciens et chimistes ont étudié les mêmes choses à des époques différentes. Avez-vous eu cette impression ?* – DJ : Oui, c'est cyclique. Notamment un matériau qui est revenu « à la mode » pour les physiciens parce que c'est un modèle pour l'étude la transition de Mott, c'est-à-dire l'influence des corrélations du système électronique est le V_2O_3 . Or c'est un matériau qui était une innovation à Bordeaux pour les chimistes du solide dès les années 60. Des matériaux reviennent souvent à la mode parce qu'ils correspondent aussi à des avancées dans les théories physiques. L'oxyde de vanadium a notamment permis de tester à Orsay au début des années 2000 la validité des théories modernes des électrons en interactions fortes. » [I Jérôme, 2006, p. 17].

¹³¹ « Wadsley faisait vraiment le poids, c'était la contrepartie de Hagenmuller puisque, lui, était vraiment branché à fond sur la *cristallo*. Hagenmuller n'appréciait pas que j'ai un contact direct avec lui parce qu'on faisait la même chose. Un jour, alors que je discutais structures avec Wadsley, Hagenmuller a voulu s'immiscer dans la conversation pour une raison futile et Wadsley l'a rabroué en disant : "*Shut up, I am speaking!*". » [I Galy, 2006, p. 17].

Conclusion

En France, c'est dans le monde académique qu'émerge la chimie du solide. Que ce soit au CNRS ou dans les facultés, des laboratoires de chimie minérale se spécialisent dans l'étude des solides à partir des années 1950. Au cours des années 1960, l'inflation de la recherche publique permet à la chimie du solide de recruter des effectifs nombreux pour atteindre une taille critique suffisante. La chimie du solide devient un métier. La communauté construit son identité sur des oppositions par rapport à ses voisins : on est chimiste par opposition aux physiciens d'abord, avec qui on entretient des relations de fascination/frustration ; on est minéraliste ensuite par opposition aux organiciens, qui manipulent des molécules et dominant encore la scène chimique ; on est universitaire enfin par opposition aux industriels qui, par leurs besoins en applications nouvelles, tour à tour stimulent ou appauvrissent la créativité. Les solidistes français revendiquent une originalité en synthèse associée à une méthodologie précise : étude de la liaison chimique (caractéristique de la chimie) à travers la relation structure-propriétés (empruntée à la physique du métal) dans une perspective appliquée (à long terme vers l'industrie). Leur champ d'action se situe à la conjonction d'un état physique – le solide – et d'une composition élémentaire – la chimie élémentaire –, qui façonnent leur conception du matériau.

Quand on élargit l'angle de vue, on aperçoit que l'après-guerre favorise, de manière générale, le renouveau de la chimie du solide européenne dans les universités. Non pas qu'il existe un objectif clair pour la CEE de construire cette discipline nouvelle mais plutôt parce que la reconstruction du continent offre les conditions économiques et politiques qui rendent possible son essor. L'importance du cadre national est d'ailleurs telle que les acteurs choisissent des périodisations différentes pour chacun des pays : continuité séculaire pour les Allemands avec une renaissance après-guerre – liée à la montée en puissance de la chimie inorganique – ; développement à partir des années 1940 pour les Britanniques ; révolution créatrice pour les Français à partir des années 1960 ; création *ex nihilo* pour les Espagnols à partir des années 1970... D'autre part, l'identité de la chimie du solide est plus ou moins forte suivant les endroits : sous-discipline de la chimie inorganique en Allemagne, étouffée par une très puissante chimie de coordination au Royaume-Uni, ou très forte communauté en France. Le découpage de la matière peut varier sensiblement à la traversée d'une frontière nationale : les Allemands distinguent une *inorganic solid state chemistry* – centrée sur la synthèse – et une *physical solid state chemistry* – qui s'occupe de non stœchiométrie et de croissance cristalline – alors que les Français adoptent une attitude plus éclectique et les considèrent simultanément.

C'est de manière transversale que la construction européenne, stimulant le besoin en matériaux nouveaux par des projets technologiques (CERN, ASE, OSE), favorise l'émergence des chimies du solide nationales. Moins que ne l'avaient déjà fait les organismes d'État (CEA, DGA pour la France, Jülich en Allemagne) mais de manière non négligeable cependant. La communauté européenne ne se forme vraiment qu'après la mise en place des principales communautés nationales. À la fin des années 1970, en effet, elle se structure autour des *European Conferences of Solid State Chemistry*.

Le pendant de l'Europe se situe outre-Atlantique : les États-Unis offrent un modèle de développement différent. Grâce à une étroite imbrication de la recherche universitaire, des organismes d'État à vocation appliquée et de la recherche industrielle privée, le système états-unien a favorisé l'émergence d'une nouvelle branche *Materials Science and Engineering* au début des années 1960. Celle-ci se définit par une recherche rapide de l'application grâce à

une organisation interdisciplinaire. Ingénieurs, métallurgistes, chimistes, physiciens travaillent dans les mêmes équipes afin de mettre au point des applications. Ce n'est pas la matière épistémologique (composition chimique, état physique) qui structure la recherche mais la matière sociale (utilité pratique). Dans un tel contexte, la chimie du solide a du mal à se faire entendre. Peu visible par rapport à la chimie moléculaire, elle trouve tant bien que mal sa place dans les laboratoires privés (Bell, IBM, GE, Corning), d'État (Lincoln, NRL) ou universitaires (Ames, Brown). Il semble que pour un solidiste américain l'Europe reste l'interlocuteur privilégié jusque vers 1990. D'autres pays développent une chimie du solide performante à partir des années 1960 – l'Australie –, puis 1970 – le Japon et l'Inde –, ou 1990 – la Chine –.

Cette comparaison de deux modèles de développement pose la question disciplinaire : l'Europe, avec ses catégories universitaires, choisit plutôt une solution « multidisciplinaire » où des laboratoires distincts collaborent tandis que les États-Unis optent pour une approche « transdisciplinaire », plus intégrée, où les divers métiers sont mélangés au quotidien avec une prédominance des physiciens. La signification du « matériau » varie alors continûment du solide, objet de science, à l'application sociale. À cette différence disciplinaire correspond aussi un écart structurel : la recherche états-unienne est orientée par des projets pluriannuels – sans contrat, pas de recherche ! – alors que la recherche européenne, plus fonctionnarisée, est moins dépendante des bailleurs de fonds. Est-ce cette sécurité professionnelle qui rend les témoins interviewés si fiers de leur liberté d'action ? Ces choix organisationnels découlent d'une tradition culturelle mais aussi d'objectifs sociaux à venir. En particulier ils mettent en question la notion d'efficacité : difficile à cerner, l'efficacité se définit rarement sans présupposés idéologiques. Elle touche aux questions d'évaluation. Or, l'évaluation intervient à deux niveaux : externe (politique, économique, social) pour orienter la recherche scientifique ; interne ou communautaire pour décerner les récompenses à tel ou tel individu (prix Nobel) ou à tel ou tel groupe (laboratoire, communauté nationale).

Cette évaluation – plus ou moins consciente pour chacun des acteurs – induit le phénomène de « mode ». À la fin des années 1960, lorsque les ingénieurs de General Motor montrent la superconduction ionique de l'alumine bêta, c'est un premier boom dans la communauté avec la pile à combustible comme objectif. Au début des années 1970, lorsque le groupe Lucas à Rennes fabrique les premiers verres de fluorure, c'est l'effervescence dans le monde des télécoms. Au tournant de 1980, les « matériaux », en particulier laser, deviennent omniprésents dans la communauté française. Au même moment, la mise en évidence d'un effet supraconducteur dans les métaux organiques (sels de Beechgard) par le groupe Jérôme à Orsay provoque un émoi international : près de dix mille chercheurs sont sur les rangs ! De même quelques années plus tard, en 1986, lorsque Müller et Berdnoz mettent en évidence la supraconductivité des cuprates de Caen, ce sont à nouveau dix mille chercheurs (mais pas forcément les mêmes) qui se ruent à la recherche du supraconducteur à température ambiante. Les années quatre-vingt-dix sont obnubilées par la mode des nano-matériaux. À ces mouvements de foule, à ces comportements communautaires ou grégaires, il convient enfin d'opposer à l'autre bout de l'échelle sociale le point de vue individuel. Revendiquant sans cesse une liberté de création et de mouvement, le solidiste français se démarque par des choix de recherche, une intégration dans la communauté des chimistes, une conception particulière du matériau, et enfin une vision de l'histoire de sa discipline ornée de légendes et de barons. N'est-ce pas tout cela qui lui confère une identité propre ?

Conclusion générale.

Conclusion générale.	559
<i>De la fragmentation à la spécialisation.</i>	<i>561</i>
<i>Dynamiques communautaires.</i>	<i>563</i>
Explosion démographique et financière.	563
La clôture d'un territoire.	564
Uniformisation des pratiques ?.....	565
Un élément fédérateur : le récit légendaire.	567
<i>La chimie du solide en société.....</i>	<i>569</i>
Contexte international.	569
Horizons communautaires.....	573

De la fragmentation à la spécialisation.

En 1950, la vulgarisation scientifique présente l'état solide comme l'un des trois principaux états de la matière, avec les états liquides et gazeux. Une telle perspective choisit l'état physique comme critère de démarcation et ordonne la matière suivant trois genres – solide, liquide, gaz –. Les composés d'un même genre sont censés présenter une similitude de comportements physiques.

Si, en partant des groupes sociaux à la même époque, on tente une cartographie de l'un des genres – par exemple l'état solide –, on repère une fragmentation déroutante. Que ce soit à l'université ou dans l'industrie des matériaux, aucune structure institutionnelle n'embrasse l'ensemble de l'état solide. Chaque groupe, semble-t-il, se focalise sur un type particulier de solides suivant sa nature chimique : métaux pour les métallurgistes, verres pour les verriers, céramiques pour les céramistes... Mais le critère chimique ne suffit pas : un physicien peut étudier des métaux (comme un métallurgiste) et des oxydes métalliques (comme un minéraliste). Au sein d'un groupe, à chaque objet (matériel) est associé un objectif. Le physicien s'intéresse surtout aux phénomènes physiques (électriques, magnétiques) alors que le métallurgiste cherche à améliorer les propriétés mécaniques et réfractaires d'un alliage en vue d'application industrielle. Le cristallographe étudie les phosphates pour en décrire la structure complexe tandis que l'industriel voudrait les produire à moindre coût. Entre d'autres termes, chaque communauté s'adresse à cet objet selon sa « matrice disciplinaire » [Kuhn, 1970]. Or, la matrice disciplinaire contient un objet (des solides), une méthode (instruments et théories) et un objectif (synthèse, structure, propriété ou application). Si on considère la matrice disciplinaire comme un tout alors chaque communauté étudie un objet différent. Faut-il en conclure qu'il n'existe pas de continuité entre l'état solide et la multitude des solides objets de science ou de technologie ?

On constate en tout cas un contraste frappant entre l'unité du concept d'état solide qui embrasse tous les solides et la fragmentation sociale que suggère l'étude effective des solides. La catégorie épistémologique des trois états de la matière dissimule l'hétérogénéité des catégories sociales qui ont chacune leur propre culture des solides.

Un champ scientifique ne se réduit pas à des structures institutionnelles facilement repérables, loin s'en faut. Le cas de la chimie met en évidence toute la complexité des relations entre organisations sociales et représentations de la matière. Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, la chimie française est structurée suivant une logique « élémentaire » qui découle de la classification périodique des éléments (tableau de Mendeleïev). Les sous-disciplines – chimie minérale, chimie organique (ou du carbone) – se distribuent suivant la composition chimique des substances qu'elles étudient. Seule la chimie physique échappe à cette logique et se réfère, non pas à la substance matérielle, mais au phénomène physique lui-même. À nouveau, quand il s'agit de classer les solides étudiés par les chimistes, la structure disciplinaire ne convient pas. Certes, c'est en chimie minérale que l'étude des composés solides est la plus dense mais on la trouve ailleurs : organiciens et physico-chimistes les étudient aussi. Le laboratoire n'est pas non plus l'entité pertinente : très souvent, un laboratoire de chimie minérale associe des travaux en solutions aqueuses, chimie des gaz et composés solides minéraux. Non, les structures institutionnelles classiques ne rendent pas compte de la variété des approches de l'état solide.

Ce n'est qu'après une enquête attentive que l'on parvient à repérer des groupes scientifiques pertinents pour les solides. Au début des années cinquante, en France, on peut

les classer suivant trois catégories : la famille scientifique, le thème transversal (par rapport à la discipline) et le collège invisible (par rapport aux institutions).

Pour la famille scientifique, c'est la *Chaudronnerie* qui, par ses méthodes originales et sa puissance sociale, offre l'exemple crucial. À la croisée de la chimie minérale et de la métallurgie, sa méthode consiste à opérer un transfert des instruments et théories de la métallurgie vers l'étude des solides minéraux et vice versa. Grâce à cette dynamique d'échange interdisciplinaire, à une stratégie de conquête sociale et à une collaboration avec l'industrie, la *Chaudronnerie* s'impose comme un acteur incontournable en France jusqu'à la fin des années soixante-dix. On y conçoit l'état solide dans une forme de continuité du minéral (oxydes métalliques) au métal en passant par l'organique (composés d'insertion). En particulier, on s'efforce d'explicitier une relation entre la structure des solides et leurs propriétés chimiques et physiques.

Deuxièmement, la Commission des hautes températures et des réfractaires du CNRS offre l'exemple d'un groupe thématique interstitiel entre physique et chimie, entre Université et industrie, entre fondamental et appliqué. Axée sur la production (générique) d'appareils et l'utilisation des hautes températures en synthèse, la Commission participe d'un « régime transverse » de production des savoirs [Shinn & Ragouet, 2005] et, plus précisément, suit une logique de « *research-technology* » [Shinn, 1997]. Dans cette perspective, les solides sont perçus à la fois comme des objets cognitifs et comme des matériaux réfractaires destinés aux applications industrielles.

Enfin, troisièmement, on repère un réseau de « chimie de l'état solide » qui se déploie en Europe occidentale (Allemagne, France, Grande-Bretagne, Scandinavie). Faiblement structuré au niveau institutionnel, ce réseau est assimilable à un « collège invisible » [Crane-Hervé, 1969], dans lequel l'état solide est conçu comme un continuum entre minéral, métal, métalloïde (le graphite) et organique. Axée sur des analyses structurales et chimiques, la chimie de l'état solide s'intéresse aux solides en tant qu'objets imparfaits (composition non stœchiométrique et dynamique réactionnelle) dans une perspective cognitive et en vue d'applications industrielles.

Ainsi, cet inventaire assoit l'idée d'une fragmentation des solides dans l'espace universitaire et industriel et suggère une succession de ruptures graduelles entre le niveau idéal (du concept) et matériel (du solide). Ce faisant, il pose la question d'une relation tripartite entre un objet d'étude (la matière), un sujet étudiant (le maillage social) et une représentation de l'objet (connaissance). Le triptyque est d'autant plus déroutant que chacun de ses éléments est partiellement déterminé par les autres : avec ses mains, ses intuitions et ses rêves, le chimiste synthétise l'objet ; l'objet, par ses qualités physiques et le regard qui l'observe, façonne une grille conceptuelle ; la représentation, à travers les croyances qui la tissent et les applications qu'elle permet, définit un métier – celui du chimiste –. Objet, sujet et représentation sont connectés par des frontières perméables, mobiles et en perpétuelle gestation.

Trente ans plus tard, cet équilibre s'est considérablement modifié. En 1980, plus personne – individu, laboratoire ou sous-discipline – n'étudie simultanément des solides, des liquides et des gaz. Plus personne non plus ne rêve d'embrasser l'état solide dans toute son étendue. La vision continuiste de la chimie de l'état solide ne s'est pas incarnée socialement. La dispersion (entre plusieurs états physiques) et l'universalité (d'un état de la matière) ont laissé place à la spécialisation. La « chimie du solide » a remplacé la chimie de l'état solide. Malgré un nom générique, elle s'est spécialisée sur les cristaux minéraux en volume. Un tel choix se situe à la conjonction d'une logique « élémentaire » (héritée de la chimie minérale) et d'une « *physicalization* » [Reinhardt, 2006] de la chimie à travers les instruments (homogénéisation et spécialisation des techniques) et, dans une moindre mesure, les théories

(lien entre modèles et objets matériels). Au sein de la chimie du solide, l'élément chimique est devenu moins crucial que la structure cristalline (rendue possible par la diffraction des rayons X). Sans disparaître, l'individualité « élémentaire » cède la première place à la combinaison atomique. Composition chimique et structure cristallographique cohabitent désormais en chimie du solide.

Au début de notre période primait la continuité épistémologique de l'état solide, vers la fin s'impose la spécialisation sociale des groupes étudiant les solides. Comment une telle évolution s'est-elle imposée ? Mon hypothèse de départ plaçait l'émergence d'une « communauté scientifique » au cœur de la dynamique de la chimie du solide.

Dynamiques communautaires.

Explosion démographique et financière.

Au début des années cinquante, les laboratoires de chimie minérale sont presque déserts : peu de personnels techniques, peu d'étudiants en thèse, peu de matériels. À leur tête, les mandarins vivent depuis trente ans dans une université bipolaire : physique/chimie, organique/minéral, liquide/solide. Des gens comme Georges Chaudron (Paris), J. D. Bernal (Cambridge) et J. A. Hedvall (Göteborg) ont constitué un « collège invisible » (européen) de chimie de l'état solide mais se reconnaissent dans les structures disciplinaires traditionnelles. La période 1950-1970 va bouleverser la donne universitaire. De profondes modifications qualitatives et une explosion quantitative vont réorganiser le paysage de la recherche scientifique. L'essor est sans commune mesure avec la période d'entre-deux-guerres et l'inflation en hommes et en matériels est sans précédent pour l'histoire nationale. En vingt ans (1950-1969), le nombre d'employés du CNRS quintuple passant de trois mille à quinze mille. Dans les facultés des sciences, le nombre d'enseignants est multiplié par dix, passant de mille à dix mille, tandis que celui des étudiants quintuple, de vingt-cinq mille à cent trente mille.¹ L'explosion démographique est encore plus forte pour l'université dans son ensemble, où le nombre total d'étudiants quintuple tous les trente ans : soixante mille en 1938 (environ 50% en sciences), trois cent mille en 1968 (45%), un million cinq en 1995 (20%) [Renaut, 1995].

Une telle croissance des effectifs s'accompagne d'une multiplication des universités d'accueil – d'une quinzaine avant 1950 à près de quatre-vingt-dix aujourd'hui –, des chaires disponibles – multipliée par trois pour les sciences entre 1950 et 1969 – et des laboratoires de recherche. En se déployant sur l'ensemble du territoire national, la politique scientifique réduit l'hégémonie parisienne (qui concentrait 80% de la recherche universitaire avant 1950). L'argent coule à flot : le budget du CNRS (à francs constants) est multiplié par vingt entre 1950 et 1969 (alors que, dans le même temps, l'effectif est seulement multiplié par cinq). La recherche scientifique et l'enseignement supérieur changent d'échelle, ce qui participe à la déstabilisation d'un système universitaire hérité de l'entre-deux-guerres.

¹ Les chiffres proviennent de [Bourdieu, 1984, p. 270]. Pour les facultés des sciences : 928 enseignants (dont 225 professeurs) et 25306 étudiants en 1950 ; 10749 enseignants (dont 696 professeurs) et 147458 étudiants en 1969 (surestimation de trente mille étudiants environ dans les classes préparatoires).

La clôture d'un territoire.

L'Université prend un coup de jeune. En 1970, la moyenne d'âge au CNRS est encore voisine de trente ans ! Dix ans plus tard, elle sera de quarante ans. Aujourd'hui elle atteint quarante-cinq ans. Au cours des décennies cinquante puis soixante, les laboratoires se peuplent et changent de visage : il n'est pas rare d'y trouver un seul (jeune) professeur (35 ans) entouré d'une dizaine de thésards (25 ans). Sur un domaine donné, la densité des travaux universitaires augmente. En amphithéâtre ou en séminaire, quelques enseignants brillants – Flahaut, Collongues, Pâris, Hagenmuller – séduisent les étudiants par des cours iconoclastes qui rompent avec la chimie descriptive, perçue comme ennuyeuse. Dans leurs laboratoires de recherche, ils se sont résolument tournés vers l'étude des solides, qui devient un sujet à la mode. Les cristaux ioniques sont particulièrement prisés et la diffraction des rayons X permet d'en donner une caractérisation structurale impeccable. L'argent reçu a permis aux laboratoires de chimie de s'équiper avec des appareils de diffraction des rayons X sur poudres. La dynamique instrument/objet est vertueuse : l'appareil de diffraction permet de caractériser le cristal, qui, une fois caractérisé, devient un objet solide encore plus intéressant, ce qui justifie l'achat de nouveaux appareils de diffraction. Par sa « précision », la diffraction des rayons X discrédite les autres moyens de caractérisation parce qu'elle est perçue comme « vraie » par les acteurs. Comme son emploi ne donne rien en chimie des solutions ou sur les composés amorphes (verres), ces domaines perdent du terrain au sein de la chimie minérale. La structure atomique des cristaux est d'autant plus cruciale qu'on essaie de plus en plus de la relier à leurs propriétés macroscopiques – comme certains chimistes le faisaient dès les années trente –. La relation structure-propriétés des minéraux constitue alors le grand défi épistémologique des minéralistes, qu'ils appliquent sur des composés de plus en plus complexes.

Si les laboratoires se peuplent de jeunes, leur nombre se multiplie aussi. En 1950, une quinzaine de laboratoires seulement est impliquée dans le réseau de chimie de l'état solide. Dix ans plus tard, ils sont déjà une trentaine et le mouvement se poursuit au sein de la chimie minérale. À la fin des années soixante, on dénombre une quarantaine de laboratoires de chimie se réclamant de l'étude des solides minéraux. Au milieu des années soixante, environ six cent personnes (dont la moitié de chercheurs) travaillent dans le champ de recherche contre une centaine seulement quinze ans plus tôt. Une telle croissance n'a pourtant rien d'exceptionnel comparée à la croissance globale à l'université et au CNRS. La densification du tissu national s'accompagne d'une triple focalisation : sur un objet bien défini – le cristal minéral –, sur l'utilisation d'une technique fétiche – la diffraction des rayons X – et sur un type de synthèse – à haute température –. Ces trois éléments sont liés les uns aux autres : les cristaux sont obtenus à haute température et la diffraction des rayons X permet d'en déterminer la structure cristalline. Contrairement à la chimie de l'état solide, les solides étudiés sont désormais principalement des minéraux, par référence à la culture « élémentaire » des minéralistes d'après-guerre. Les années soixante sont marquées par le développement de la « cristallogénèse », qui rend les chimistes indispensables aux physiciens dans les collaborations bipartites. Par ce rapprochement multidisciplinaire, les chimistes sont de plus en plus sensibilisés aux caractérisations physiques.

La cure de jouvence et le renouveau méthodologique s'accompagnent d'une réorganisation communautaire. De plus en plus de minéralistes se sentent « chimistes du solide » ou « solidistes ». Au début des années soixante, ils commencent à se réunir à des séances communes de la Société chimique de France ; au cours de l'année 1961-1962, la *Chaudronnerie* organise un séminaire sur les solides ioniques avec les physiciens du CEA ; un colloque international du CNRS se tient à Bordeaux en 1964 sur les oxydes métalliques et un autre, à Paris, l'année suivante, sur les matériaux réfractaires ; en 1966, lors du lancement

des laboratoires associés au CNRS, plusieurs laboratoires étudiant les solides minéraux sont accrédités par le CNRS ; un premier séminaire annuel de « chimie de l'état solide » est organisé durant l'année universitaire 1966-1967 – il se tiendra pendant dix ans – ; en 1969, un projet de laboratoire propre de « chimie du solide » est présenté au Comité national par Hagenmuller pour Bordeaux... Au cours des années soixante, en France, le « collège invisible » de chimie de l'état solide cède la place à une « communauté scientifique » de chimie du solide, qui se construit au sein de la chimie minérale. Cette évolution ne s'accompagne pas de la création d'une revue nationale spécialisée.² L'institutionnalisation de la chimie du solide durant les années soixante-dix provoque la disparition de la chimie minérale : création du laboratoire propre de « chimie du solide » à Bordeaux (1974) ; transformation de la section CNRS « chimie minérale » en « chimie des matériaux solides » (1975) ; mise en place par le CNRS et la DGRST d'un groupe de prospective (1974-1977) ; entrée des premiers solidistes comme correspondants à l'Académie des sciences (1978) – Caro, Hagenmuller, Flahaut – puis comme membres (génération suivante) : Rouxel, Pouchard, Livage, Férey, Raveau, Lucas, Tarascon. À part quelques exceptions, pour la majorité des scientifiques français l'Institut de France reste aujourd'hui encore l'un des insignes de distinction et de reconnaissance d'une personne et de la discipline qu'elle représente. À la fin des années quatre-vingt-dix, Rouxel reçoit la médaille d'or du CNRS et obtient une chaire au Collège de France. L'institutionnalisation est achevée.

Plusieurs historiens – notamment Spencer Weart et Yves Gingras – décrivent l'émergence d'un champ de recherche en deux temps : premièrement développement d'une nouvelle pratique de recherche, deuxièmement reconnaissance sociale du groupe des praticiens.³ Et puis ils s'arrêtent là. Dans notre cas, on a suivi l'émergence de nouvelles pratiques au sein d'un collège invisible, s'appuyant sur la chimie minérale et la *Chaudronnerie*, puis la montée en puissance d'une communauté avec l'école de recherche *hagenmullerienne* (Ouest de la France) qui circonscrit et délimite les contours du champ de recherche. On pourrait s'arrêter là. Il a paru pourtant intéressant de pousser plus loin l'investigation, en utilisant les ressources de l'histoire orale. La question à considérer alors devient : comment les contours de la discipline se sont-ils fixés ? Pourquoi est-ce la solution au contenu épistémologique le plus étroit qui s'est institutionnalisée ?

Uniformisation des pratiques ?

Une première raison peut être le changement de générations. La chimie de l'état solide, développée par les mandarins de l'entre-deux-guerres, n'accepte jamais de sacrifier la chimie minérale et, ce faisant, se moule dans les classifications préexistantes. Chimiste de l'état solide n'est pas une activité à temps plein, c'est presque du dilettantisme comparé au métier de minéraliste. En revanche, la génération des années soixante se sent moins liée à la chimie minérale et n'hésite pas à sacrifier la chimie minérale en solution au profit d'une

² L'émergence de la chimie du solide montre que le scénario de construction d'une communauté proposé par des sociologues comme Hagstrom [1965] est trop schématique : « Hagstrom explique comment, lorsqu'on se dirige dans des voies nouvelles, la rupture sur le plan scientifique s'accompagne d'une rupture sur le plan social ; on crée un langage propre, un jargon spécialisé, puis des équipes, des groupes scientifiques séparés, des laboratoires distincts qui sont baptisés avec des noms se référant aux recherches nouvelles. On peut encore continuer à publier dans des revues "classiques" mais la résistance se faisant sentir là aussi, on crée des organes de publication spécialisés qui utiliseront le langage nouveau et qui auront une clientèle choisie ; on tient aussi des réunions et des congrès séparés : le schisme est consommé, une école, une discipline nouvelles sont nées. » [Lemaine & al., 1969, p. 161-162]

³ Spencer Weart [1992] sur *The solid community*, Yves Gingras [1991] dans *Physics and the Rise of Scientific Research in Canada*, voir aussi [Bourdieu, 2001, p. 100-101].

nouvelle matrice disciplinaire. D'une multitude de pratiques imbriquées émerge une méthode commune de recherche, centrée sur la double relation : structure-propriétés et propriétés-applications. L'établissement de ce paradigme nouveau nécessite un effort de conversion mené dans les institutions universitaires. Hagenmuller est le plus doué à ce jeu-là. Ce n'est pas lui qui impose la méthode – la *Chaudronnerie* et la famille Trombe s'y adonnent depuis longtemps – mais il se fait l'apôtre de la restriction d'un territoire autour du solide minéral, en volume. Comme Bordeaux devient une « usine à thèses » dont les anciens étudiants vont coloniser les régions françaises, il est plus facile de convaincre que les bons solides sont ceux qui sont étudiés à Bordeaux. Bien sûr Hagenmuller n'est pas seul – d'autres y travaillent comme lui – mais c'est lui qui constitue la figure la plus emblématique de la chimie du solide en France.

Schématiquement, sur le plan institutionnel la construction de la communauté emprunte trois voies : persuasion, intimidation et exclusion. La persuasion opère par l'entremise des rapports des sections CNRS (rédigés par les mandarins), des rapports de laboratoire (rédigés par les directeurs), des rapports occasionnels (la prospective de 1977), des titres et travaux scientifiques. À ce jeu, quelques privilégiés ont plus voix au chapitre que d'autres. Le deuxième mode – l'intimidation – consiste à manœuvrer dans les commissions. En particulier, le Comité national du CNRS et le Conseil national des universités permettent de favoriser ou de brimer certains chercheurs, certaines équipes, certains laboratoires. Entre 1960 et 1980, le laboratoire Hagenmuller bénéficie de ces jeux de pouvoir. Au contraire, au début des années soixante, le laboratoire lyonnais (Pâris) est mis au ban de la communauté parce qu'il travaille sur des solides mal cristallisés. En 1975, la section CNRS décide de couper les crédits du laboratoire de Nancy (Héroid) qui étudie le graphite. Deschanvres à Caen, Lucas à Rennes, Galy à Toulouse sont mis en quarantaine pour crime de lèse-majesté. Ils obtiennent moins de postes, moins de financements et sont parfois même moins cités par certains collègues. Il faut alors chercher d'autres appuis internes, auprès d'autres « patrons » – Collongues et Fayard par exemple –, ou des appuis externes. Les pressions et mesures de rétorsion sont d'autant plus efficaces que le système mandarin est fort (peu de contre-pouvoir) et que la communauté est « fermée » sur elle-même. À la Société chimique de France, Hagenmuller est connu pour assister à la présentation de ses propres étudiants puis pour s'en aller quand les étudiants des autres écoles parlent. Troisièmement, la communauté se structure au prix d'exclusions. Si l'orthodoxie est si importante au cours des années soixante-dix, c'est parce que les hétérodoxes ont été exclus de la communauté. Cette exclusion a commencé au cours des années cinquante : Félix Bertaut et son équipe par exemple sont renvoyés hors de la communauté des chimistes. Mais à ce moment-là, la multiplication des groupes et des objectifs rend la coexistence plus facile : hautes températures, chimie de l'état solide et chimie métallurgique se côtoient et se nourrissent l'une l'autre. Au cours des années soixante, une partie des hautes températures – la synthèse et les réfractaires – est partiellement intégrée à la communauté, tandis que l'autre partie – conception d'instruments (fours, pyrométrie) – quitte l'orbite de la chimie du solide. Le groupe des laboratoires d'Odeillo offre un bon exemple d'une trajectoire centrifuge, du cœur de la chimie de l'état solide vers la périphérie de la chimie du solide, et enfin, son exclusion vers les sciences pour l'ingénieur. Lors de la construction d'une communauté fermée, soit les éléments déviants rentrent dans le rang, soit ils quittent sa sphère d'influence. Bénard par exemple n'est considéré comme un solidiste que par une seule témoin (qui a connu les années cinquante), et, par la suite, il sera étiqueté métallurgiste. Évidemment, cette description est un peu schématique : les évolutions et les actions ne sont pas toutes consciemment réfléchies et personne n'a dans l'idée dès 1950 ou 1960 de construire une communauté de chimie du solide.

Quoi qu'il en soit la communauté de chimie du solide devient une réalité quotidienne pour les acteurs au cours des années soixante et soixante-dix. Ceci est d'autant plus étonnant que l'uniformisation des pratiques n'est pas complète. Une étude de cas approfondie montre combien certains laboratoires conservent une spécificité propre, un programme de recherche local et continuent de défendre, jusqu'à la fin des années quatre-vingt, leur école de recherche (Flahaut et Trombe en particulier). Comment la communauté construit-elle son identité malgré des hétérogénéités locales, qui semblent irréductibles ?

Un élément fédérateur : le récit légendaire.

Kuhn pensait qu'un nouveau paradigme émerge, grâce à un renouveau générationnel, après la mort d'une génération ancienne. On a vu que c'est en partie le cas pour la chimie du solide : la chimie du solide finit de s'institutionnaliser au moment où les chimistes de l'état solide et les minéralistes d'avant-guerre sont partis à la retraite. Les sociologues du programme empirique de relativisme ont quant à eux insisté sur l'exclusion des perdants (ou déviants) en dehors du « noyau dur » lors du règlement d'une controverse.⁴ Ces deux approches – induites par Kuhn et Collins – sous-estiment l'hétérogénéité d'une communauté scientifique. Certes, au premier coup d'œil, la matrice disciplinaire paraît homogène, son « noyau dur » unifié et univoque. Pourtant, si l'on adopte une perspective descendante [Gyerin, 1999], chaque fois qu'une entité sociale paraît homogène, un grossissement ultérieur révèle des hétérogénéités en son sein. En se focalisant sur la recherche scientifique, on repère l'industrie privée, l'industrie publique et la recherche universitaire. Ces distinctions sont importantes dans la mesure où chaque individu, malgré la marge de manœuvre dont il dispose, est influencé par les logiques de l'institution pour laquelle il travaille. En se plaçant au niveau de l'université, on distingue un laboratoire propre du CNRS comme le Laboratoire des terres rares (nombreux techniciens et peu de thésards), d'un laboratoire universitaire comme le Laboratoire de chimie minérale et structurale, à la faculté de pharmacie (étudiants pharmaciens en thèse de chimie), d'un laboratoire d'école d'ingénieurs comme le Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide (qui accueille des ingénieurs sur des mini-thèses pour des projets courts). En observant la communauté de chimie du solide, on découvre des « familles scientifiques » et des « écoles de recherche » [Geison, 1981 ; Nye, 1993] dans lesquelles chaque membre connaît sa propre filiation (ce qui est courant) mais aussi la généalogie des autres membres de la communauté, ce qui est l'une des spécificités de la chimie du solide (suggérée par Hervé Arribart). L'hétérogénéité se manifeste également dans la manière dont la recherche se structure dans les principaux laboratoires : on distingue ainsi des logiques propres à chaque groupe de recherche : « élémentaire », « élémentaire-instrumentale », « instrumentale-historique », « systématique-élémentaire ». Quand on visite un laboratoire, on rencontre des secrétaires, des techniciens chimistes, des cristallographes, des physico-chimistes, des théoriciens. En discutant avec eux, on perçoit la complexité de leurs propres représentations et de leurs positionnements, qu'aucune étiquette sociale ne pourra jamais cerner.

Comment une telle imbrication de strates hétérogènes (institutionnelles, professionnelles, familiales) et un tel foisonnement de référents (collectifs et individuels) peuvent-ils être subsumés sous une identité communautaire unique ? Comment les écarts à la

⁴ Une étude de cas montrant l'exclusion du « noyau dur » particulièrement convaincante est le règlement de *The Great Devonian Controversy* mis en scène par un historien, Martin Rudwick (1985), proche de Harry Collins (indication de Benoît Lelong).

norme, les divergences ponctuelles, les altérités irréductibles restent-ils cohérents ? C'est ici qu'intervient la puissance unificatrice du mythe fondateur. Ce qui rapproche les acteurs c'est le récit légendaire que nous avons présenté au début de cette thèse. Pourquoi ce récit est-il mythique ? Parce qu'il contient quatre caractéristiques essentielles du mythe [Girardet, 1986] : un pouvoir explicatif (du processus historique), une dimension idéologique (valorisation des grands hommes, âge d'or, déclin), une fonction créatrice (dynamique communautaire) et une valeur affective (existences personnelles d'hommes et de femmes). À travers le récit légendaire, l'autre se rapproche, le différent devient semblable, l'alter ego est identique.⁵

Si le récit légendaire est si puissant pour construire le même, c'est parce qu'il ne cesse de désigner l'Autre. De même que la physique des solides souffre d'un complexe vis-à-vis de la physique des particules [Hoddeson & al., 1992], la chimie du solide se nourrit d'un sentiment d'infériorité vis-à-vis de la physique des solides. Ce sentiment est constitutif de la communauté puisque définir l'Autre est un bon moyen de se connaître soi-même et de reconnaître l'autre soi-même. La communauté de chimie du solide se définit par de multiples extérieurs : disciplines universitaires, instrumentation, industrie, sphère politique, environnement international. Ces mondes extérieurs sont identifiés parce qu'ils partagent des frontières communes avec la chimie du solide. Ce faisant, ils servent de repère identitaire.

Ainsi, le solidiste se démarque du physicien par son intérêt pour le composé matériel (plutôt que pour le phénomène) ; de l'organicien, par sa focalisation sur le solide (plutôt que sur la molécule) ; de l'industriel par un intérêt cognitif (supérieur aux applications) ; de l'Allemand par une focalisation sur la non-stœchiométrie (contre des caractérisations analytiques et structurales impeccables) ; de l'Américain par une originalité en synthèse (contre un savoir-faire en procédés). Chaque différence perçue – même schématique, voire fantasmatique – renforce l'identité propre de la communauté française de chimie du solide.

Si la frontière constitue un repère identitaire, elle représente aussi un lieu d'échange et de création. C'est la multiplication des collaborations avec les physiciens au cours des années soixante qui a permis une sensibilisation accrue des chimistes aux propriétés physiques. L'approche se veut multidisciplinaire plutôt qu'interdisciplinaire (contrairement aux *Materials scientists* états-uniens). L'instrumentation joue un rôle primordial dans le dynamisme de la chimie du solide : diffraction des rayons X au cours des années soixante, microscopie électronique et spectroscopie à partir des années soixante-dix, grands instruments (EXAFS) au cours des années quatre-vingt. À ce moment-là, l'informatique commence aussi à occuper une place importante dans un laboratoire de chimie par la gestion instrumentale et le traitement de textes et des données qu'elle permet. Par la suite, durant les années quatre-vingt-dix, la programmation numérique rend plus accessibles aux chimistes les modélisations théoriques.

L'étranger joue lui aussi un rôle bien spécifique dans le récit légendaire : tantôt il représente un Eldorado, tantôt il sert à valoriser l'espace national. Selon un schéma classique

⁵ Certains modèles théoriques, malgré leur puissance explicative, ont souvent tendance à exagérer les enjeux d'argent, de pouvoir/prestige et de savoir et à négliger l'aspect affectif des relations humaines : « le fonctionnement de la cité scientifique repose sur la compétition et l'existence d'un certain système de récompenses [auquel les auteurs ajoutent le désir de connaître et le développement des idées] » [Lemaine & al. 1969, p. 147]. On pense aussi au recours incessant de Bourdieu [1984] aux hiérarchies dominant/dominé et au concept de « capital scientifique ». Au contraire, Nye [1993, p. 4], en se basant sur une étude historique, souligne clairement ce qui fait l'identité d'une communauté (même si elle ne hiérarchise pas l'importance des éléments) : « a schema for the construction of identity consisting of six elements or components, which briefly may be summarized as (1) genealogy and family descent, including historical mythology of heroic origins and heroic episodes; (2) core literature defining the group's archetypal language and imagery; (3) practices and rituals; (4) physical homeland including institutions based on citizenship rights and responsibilities; (5) external recognition; and (6) shared values and unsolved problems. »

on se réfère à un lieu fascinant ou à un âge lointain pour défendre une cause locale. Dans l'imaginaire collectif, l'« âge d'or » de la chimie du solide française se situe entre les années soixante et quatre-vingt (indépendance de la recherche, originalité de la synthèse), suivi par une période que l'on caractérise par un « déclin » de productivité. Quel que soit son discours (optimiste ou pessimiste), chaque acteur profite souvent de ses relations avec l'étranger pour accroître ses propres savoir-faire.

De la même manière que l'État moderne a forgé le mythe national pour devenir État-nation en absorbant les régionalismes réfractaires, la chimie du solide a gommé les hétérogénéités locales grâce au récit légendaire. Celui-ci contient les ingrédients traditionnels du mythe, propres à la culture occidentale. Il raconte une histoire commune – celle des grands hommes et des révolutions scientifiques – qui assure une légitimité à la discipline émergente. Ce faisant, la chimie du solide est devenue un lieu de vie communautaire, porteur d'un sentiment identitaire fort vis-à-vis de multiples extérieurs. Néanmoins, si la dialectique identité/altérité est pertinente pour raconter la construction d'une communauté, elle passe sous silence tout le processus historique extérieur au groupe. Il est temps d'élargir à nouveau la perspective, en replaçant la chimie du solide dans une dynamique plus vaste, et d'interroger la pertinence de l'approche communautaire pour comprendre l'ensemble de la période 1950-2000.

La chimie du solide en société

Contexte international.

L'inflation de la recherche scientifique française d'après-guerre s'inscrit dans un contexte international spécifique. L'Europe sort dévastée et ruinée de la Seconde Guerre mondiale et, à l'époque, la situation désastreuse de l'Université paraît bien anecdotique par rapport à l'urgence économique et sociale. En France, le Commissariat général au Plan dirigé par Jean Monnet et les crédits du plan Marshall – le pays reçoit cinq milliards de dollars – conduisent à une rapide relance économique et financière. Au début des années cinquante, la croissance atteint déjà 5% par an [Becker, 1988, p. 49]. Depuis 1945 (rapport Vannevar Bush), les États-Unis ont inscrit la recherche appliquée parmi les enjeux économiques et stratégiques du développement national. La guerre froide vient renforcer cette option. On exige des scientifiques de nouveaux matériaux et de nouvelles gestions des ressources (humaines ou cognitives) [Dahan & Pestre, 2004]. La France et l'Europe emboîtent le pas du Nouveau Monde et développent leurs propres domaines stratégiques (nucléaire, aéronautique, espace, militaire, électronique). Pour un pays comme la France, les crédits de recherche industrielle (publique et privée) sont bien supérieurs à ceux de la recherche universitaire. Une estimation en 1960 donne un facteur dix entre les deux.⁶

Sur le terrain des matériaux, les alliages métalliques représentent une large majorité des « matériaux d'ingénierie » utilisés dans le monde jusqu'aux années soixante – 73% en

⁶ En mai 1961, quand *le Progrès scientifique*, organe de vulgarisation de la DGRST pour la classe politique, propose une « évaluation approximative des dépenses de recherche en 1960 » pour la France, il donne les chiffres suivants : CNRS, 248 millions de nouveaux francs (350 millions d'euros 2006) ; université, 90 millions pour le matériel, 135 pour salaires (320 millions d'euros 2006) ; CEA, 328 millions (464 millions d'euros 2006) ; « études et prototypes militaires », 1,13 milliard (1,6 milliard d'euros 2006) ; industrie privée, 1,55 milliard (2,2 milliards d'euros 2006).

1940, 82% en 1960 – puis leur hégémonie décline – 56% en 1990 (estimation), 27% en 2020 (prospection) – [Ashby, 1987]. Ce mouvement correspond non seulement à un remplacement des alliages métalliques par de nouveaux composés mais encore à la mise sur le marché de produits aux fonctions inédites. Ces « matériaux nouveaux » (mieux rendu par l'expression anglophone de « *advanced materials* ») actionnent les ressorts économiques et façonnent des stratégies nationales [Cohendet & al., 1987]. Avant de remplacer les alliages métalliques, il a fallu étudier et développer leurs concurrents directs : céramiques (8% en 1940, 7% en 1960, 11% en 1990) ; composites (3%, 2%, 13%) ; polymères (16%, 10%, 21%). En volume, ce sont les polymères qui constituent le principal vecteur de remplacement des matériaux métalliques. Les décennies qui précèdent le remplacement sont marquées par un effort de recherche industrielle vers les nouveaux matériaux, effort qui influence la recherche universitaire. La chimie du solide regorge d'exemples de ce type. En matière de matériaux céramiques et composites, elle a largement contribué à la synthèse de certains de ces matériaux. Tous les projets n'ont pas abouti à des produits commerciaux mais tous ont marqué la recherche universitaire, à tel point qu'il est possible de proposer un découpage par périodes successives, associées à différents matériaux.

Au cours des années cinquante, les réfractaires et les matériaux nucléaires sont très étudiés en chimie minérale. Par ses financements R&D, le CEA constitue l'un des principaux vecteurs de recherche. Il lance par exemple un vaste programme de recherche sur les céramiques – en particulier la zircone –, qui soutient la chimie des hautes températures. Aujourd'hui encore, les centrales nucléaires comprennent des pièces en zircone. Le CEA finance aussi de nombreuses études sur les oxydes d'uranium. Ces deux thèmes sont particulièrement déterminants pour des laboratoires comme le Centre d'études de chimie métallurgique ou le Laboratoire de chimie minérale (Prigent) à Rennes. Dans certains cas, ce n'est pas la demande industrielle qui lance un matériau utilisable mais le hasard : à partir de 1951, Hérold, à Mulhouse puis à Nancy, étudie l'insertion d'halogènes dans le graphite. Ces travaux (et d'autres) conduisent, cinquante ans plus tard, à la mise sur le marché de batteries au lithium, désormais couramment utilisées pour les ordinateurs et téléphones portables.

La décennie soixante est marquée par les grands travaux sur l'énergie solaire, qui conduisent à la construction du four solaire d'Odeillo à 1000kW. Dans le même temps, les universitaires s'interrogent sur la faisabilité et la rentabilité de « piles à combustible » : dès 1963, une Recherche coopérative sur programme (dirigée par M. Bonnemay) est lancée par la section de « chimie physique » [RA CNRS, 1964]. Electrochimistes et chimistes de l'état solide y participent aussi. Mais c'est surtout la mise en évidence de la superconduction ionique de l'alumine bêta par les ingénieurs de Ford aux États-Unis qui lance véritablement les recherches internationales sur les piles à combustible à la fin de la décennie.

Tout au long des années soixante-dix – voire au-delà – EDF, CGE, Renault, Air liquide financent des thèses de chimie du solide (et de physique du solide) sur la conduction ionique : alumine bêta, nafion[®], nasicon... La crise énergétique confirme l'actualité du domaine et le stockage de l'hydrogène dans les solides devient un sujet phare de la communauté française (Bordeaux en tête). Mais ce n'est qu'aujourd'hui, quarante ans après la publication des travaux de Ford, que les piles à combustible deviennent des produits commerciaux, non pas pour la locomotion d'automobiles, mais pour des systèmes immobiles comme les générateurs d'appoint (en remplacement des groupes électrogènes). Les projets aérospatiaux se nourrissent aussi du savoir-faire des solidistes : ainsi, à Bordeaux, Naslain et son équipe travaillent en étroite collaboration avec la Société européenne de propulsion pour la fusée Ariane dès les années soixante-dix. Dans un autre domaine, les télécommunications, la synthèse de verres de fluorure à Rennes marque le lancement d'une course fébrile en Occident et au Japon pour fabriquer de nouvelles fibres optiques. En France, avec le

financement soutenu du CNET et de la DGA, les universitaires rennais (Lucas) parviennent à commercialiser une fibre optique pour des applications très spécifiques. Certaines fibres de la société Le Verre fluoré équipent par exemple l'interféromètre du *European Southern Observatory* (La Silla) au Chili. Dans ce cas précis, la mise sur le marché n'a pris qu'une vingtaine d'années, pour un usage très spécifique néanmoins.

Au cours des années quatre-vingt, les matériaux laser à base de terres rares sont largement financés par les militaires. C'est le temps de la « Guerre des étoiles » (Initiative de défense stratégique) lancée par Ronald Reagan aux États-Unis. Ces matériaux laser, qui agitent la communauté durant les années quatre-vingt, ne sont toujours pas commercialisés. Tel est le sort aussi des supraconducteurs « cuprates », qui, après avoir suscité de folles espérances dans la communauté internationale universitaire (dix mille chercheurs !) et industrielle (secteur énergétique) pendant près de dix ans, redeviennent de jolies « curiosités de laboratoire ». Ce n'est pas le cas des verres TeX, fabriqués à Rennes en 1984, qui équipent depuis quelques mois le système de guidage de nuit de certains modèles de BMW. Là encore, militaires, industries aéronautiques et des télécoms ont largement contribué à la mise au point de ces produits. Au cours des années quatre-vingt encore, la SNCF propose un problème de résistance des matériaux au Pirmat pour réaliser un TGV à deux étages. Un peu de moins de vingt ans plus tard, au début du millénaire, ces TGV roulent sur le réseau des chemins de fer français.

Si les matériaux connaissent aussi les effets de mode, il est cependant des matériaux ou des structures qui traversent les époques, ou réapparaissent à intervalles réguliers, suivant des cycles. Ainsi, les bronzes de vanadium ont été largement étudiés par les solidistes (en particulier les « Bordelais ») au cours des années soixante puis ont passé de mode. Trop complexes, ils n'intéressaient d'ailleurs pas les physiciens. Ils ont été relancés, au cours des années quatre-vingt-dix, par des équipes de physiciens japonais comme matériaux modèles pour tester les nouvelles théories physiques. De même, certaines structures cristallines ne meurent jamais. Les fluorines et pyrochlores ont eu leur heure de gloire au début des années soixante-dix pour fabriquer des matériaux laser à base de terres rares et des capteurs gazeux avant de perdre leur intérêt. Aujourd'hui, des industriels comme Rhône-Poulenc réutilisent ces structures cristallines pour fabriquer des catalyseurs pour pots catalytiques.⁷

Tout au long de la période 1950-2000, la chimie du solide est donc soumise à des enjeux économiques et stratégiques qui la dépassent mais dont elle constitue un rouage de base. Elle n'attend pas la réduction des crédits publics au début des années soixante-dix pour collaborer avec l'industrie. Suivant une perspective ascendante, partir des solides de laboratoire et les voir se transformer (ou non) en matériaux commerciaux permet de mettre en évidence les logiques de la « triple hélice » université-État-industrie [Etzkowitz, Leydersdoff, 1998]. Cette démarche permet de tirer les fils qui relient l'université aux sphères politiques, industrielles et économiques. Elle montre que l'État peut être relayé par des organisations supranationales (CEE puis UE). Elle souligne aussi le temps et les efforts nécessaires pour qu'un solide universitaire devienne un matériau commercial : plusieurs dizaines d'années et des millions d'euros. Il est difficile de dire si l'intervalle de temps entre invention et commercialisation augmente ou diminue avec le peu d'exemples commerciaux dont je dispose.

⁷ « Aujourd'hui, on cherche à mettre au point le meilleur catalyseur ou support de catalyseur pour la déposition automobile. Comme c'est basé sur de la conduction en oxygène, on va travailler sur le dopage des phases pour que l'oxygène puisse sortir et revenir dans la structure, le plus rapidement possible, à haute température. C'est de la vraie cristallographie, on est parti des phases fluorines, on est passé aux pyrochlores, on est en train de regarder d'autres phases. » [I Maestro, 2007, p. 6].

La perspective ascendante permet enfin de replacer le développement de la communauté dans une évolution universitaire plus générale. Au niveau national, la chimie du solide ne constitue qu'un cas particulier parmi d'autres disciplines dont le développement est assuré par une demande d'applications en provenance de l'industrie. La catalyse par exemple se construit sur un besoin en catalyseurs des industries pétrochimiques [Voillequin, 2005]. L'émergence de la catalyse comme champ scientifique focalisé sur les surfaces et les interfaces se déroule parallèlement au recentrage de la chimie du solide sur le volume.⁸ Cette spécialisation de la recherche universitaire est d'autant plus significative que, dans le même temps, l'université réorganise ses enseignements devant le flux croissant des nouveaux étudiants. Délaissant ses ambitions universelles – et la « culture générale » –, l'enseignement universitaire favorise lui-aussi une spécialisation des filières et des formations [Renaut, 1995].

En termes d'effectifs, la communauté de chimie du solide suit une évolution semblable à celle de la chimie universitaire. La croissance est forte sur la période 1946-1966 – multiplication par trois du nombre de laboratoires et par dix des effectifs –. Le milieu des années 1970 marque un fléchissement des recrutements. En 1992, une pyramide des âges de la section 19 « élaboration, caractérisation et modélisation du solide » montre qu'il manque une classe d'âge entre 40 et 44 ans (celle qui a entre 22 et 26 ans en 1974). On observe ce même creux – quoique moins prononcé – pour l'ensemble du département des sciences chimiques [CNRS, 1992]. De la fin des années soixante à la fin des années quatre-vingt-dix, le nombre de laboratoires de la communauté reste à peu près constant, une quarantaine d'unités de recherche. Cette stabilité masque des cycles de vie des laboratoires (certains disparaissent) et une réorganisation administrative : la tendance des vingt dernières années est au regroupement des laboratoires dans des unités plus grosses pour atteindre une taille critique suffisante. Dans le même temps, la taille de la communauté croît : une centaine de chercheurs vers 1950, un millier à la fin des années soixante, deux mille au milieu des années quatre-vingt-dix, dont 30% de non permanents (essentiellement les thésards et postdoc).⁹ À la fin de la décennie, la taille de la communauté amorce une décrue. Il est étonnant de voir à quel point la communauté de chimie du solide représente une part fixe de l'ensemble de la chimie. Au cours des années soixante, la section « chimie minérale » du CNRS représente environ 17% des effectifs chercheurs de la chimie. Trente ans plus tard, au début des années quatre-vingt-dix, la section 19 « élaboration, caractérisation et modélisation du solide » représente environ 19% des effectifs chercheurs de la chimie. Cette proportion stable suggère que la chimie du solide a acquis une certaine pérennité et qu'elle est insensible aux effets de mode passagère malgré son ouverture aux demandes économiques et sociales.

La recherche universitaire s'est aussi considérablement internationalisée au cours de la période. Les années soixante en particulier voient la multiplication des revues et des congrès internationaux. La science est devenue mondiale. La chimie du solide s'inscrit dans cette dynamique. Si Hagenmuller apparaît comme l'artisan de l'ouverture de la France à l'étranger, c'est parce que l'apogée de son laboratoire coïncide avec l'avènement de la science internationale – ce qui n'enlève rien à sa renommée internationale –. Chaudron défendait déjà une approche internationale de la science mais, à l'apogée du CECM au cours des années cinquante, les échanges internationaux n'avaient pas l'ampleur de ceux des années soixante-dix. Si le récit légendaire insiste sur l'histoire nationale, un regard en Allemagne montre une situation comparable – malgré des différences –. Globalement, la science européenne, par ses

⁸ Durant les années quatre-vingt-dix, la section 18 du CNRS s'intitule « Éléments de transition — Interfaces et catalyse ».

⁹ J'assimile la section 19 – qui contient aussi des métallurgistes – à la communauté de chimie du solide, ce qui est abusif mais pratique. Le rapport d'activité du CNRS donne les chiffres suivants pour la section 19, en 1996 : 41 laboratoires dont 7 UPR, 10 UMR, 3 ESA, 20 URA ; 390 chercheurs CNRS, 532 chercheurs non-CNRS, 357 ITA CNRS, 207 ITA non-CNRS, 635 non permanents (thésards et postdoc) [RA CNRS, 1996, p. 169].

références disciplinaires marquées, a permis le développement de la chimie du solide après-guerre.

Horizons communautaires.

L'analyse historique révèle cependant un paradoxe dans la chimie du solide. Bien qu'elle participe à la dynamique de la science et de la « triple hélice », elle est invisible. Malgré ses apports essentiels à la société, ce n'est pas un domaine médiatisé comme la radioactivité ou la génétique. Combien de fois ai-je vainement essayé d'expliquer ce qu'était la chimie du solide aux « citoyens profanes » [Callon & al., 2001] ? Les solidistes ont eu les mêmes problèmes pour faire partager leur travail à leurs proches.¹⁰ Dès que l'on s'écarte un peu trop de la communauté de chimie du solide, celle-ci s'efface. Elle voit loin mais on la voit peu. L'*horizon communautaire* d'une sous-discipline est bien souvent restreint.

Cette absence de visibilité pose la question du statut du chimiste en France. À la différence des chimistes de Dupont de Nemours devenus des figures influentes de la société américaine au début des années cinquante [N'Diaye, 2001], les chimistes français n'ont pas été des héros nationaux sur la période 1950-2000. Ces élites ignorées souffrent d'un manque de reconnaissance vis-à-vis de la société. On comprend dès lors ce besoin de se mettre en scène, de raconter les temps héroïques, de rêver en écoutant le récit légendaire. Il est d'ailleurs tout à fait piquant que le récit légendaire emprunte des structures mythiques de la culture occidentale, qui justement dénigre la chimie. Au sein de la communauté, le besoin de reconnaissance attise l'intérêt pour l'Académie des sciences et le mirage du prix Nobel. Le prix Nobel "manqué" des « cuprates », qui a échoué aux physiciens, en dit long sur la frustration induite par le manque de reconnaissance pour un travail qui, légitimement, peut y prétendre. Très récemment, le prix Nobel de physique 2007 a été attribué à un physicien pour ses travaux sur les « nano-technologies ». Pourquoi dans un domaine aussi interdisciplinaire ne pas l'avoir accordé conjointement à un physicien et un chimiste ? Bien souvent, les chimistes ont l'impression que la physique récupère le fruit de leurs efforts. La chimie, qui joue un « rôle » majeur dans la société, souffre plus que jamais de sa mauvaise « image » [Bram & al., 1995]. Quand la chimie n'est plus invisible et devient médiatique, ce n'est pas pour vanter sa contribution à la société de consommation mais, très souvent, pour souligner les dangers qu'elle représente pour l'environnement ou pour l'être humain. Médiatisation du pire et silence du meilleur, tel est le lot du chimiste contemporain.

La chimie du solide participe de cette logique d'un travail quotidien invisible. À cet égard le contraste est manifeste avec le secteur très médiatisé de la science et du génie des matériaux aux États-Unis. La notion de matériaux a permis de fédérer une multitude de communautés scientifiques invisibles (chimie du solide, chimie des interfaces, polymères, ingénierie) et leur rassemblement dans le congrès de la *Materials Research Society* chaque année fait événement. Ce modèle très prisé par le métallurgiste anglais Robert Cahn, [Cahn, 2001], n'a guère séduit les Français qui semblent plus attachés à une distribution classique des disciplines¹¹.

¹⁰ « Je me rappelle, quand j'ai commencé ma thèse, je disais à ma mère qui n'était pas scientifique : je vais travailler sur un matériau qui va servir pour les têtes de fusée quand elles rentrent dans l'atmosphère. Aujourd'hui n'importe quel môme qui regarde la télévision sait que lorsqu'une fusée rentre dans l'atmosphère, elle s'échauffe énormément et que le nez doit être dans un matériau qui résiste. En général, ce sont des oxydes réfractaires et pas des métaux. » [I Kahn-Harari, 2004, p. 4].

¹¹ Au contraire, Lanciano-Morandat [1999] insiste sur l'importance de la discipline en recherche universitaire en montrant que la mise en place des départements scientifiques au CNRS a permis la formation d'une

L'invisibilité de la communauté s'est renforcée, me semble-t-il, au cours des deux dernières décennies du siècle. Le sentiment communautaire lui-même s'est affaibli : le récit légendaire a perdu sa force, les centres de pouvoir se sont multipliés et l'autonomie des individus s'est accrue. Il est probable que la communauté, fermée au cours des années soixante-dix, s'ouvre par la suite : le renouveau en synthèse et la dynamique instrumentale l'attestent. Cette multiplication des référents n'est probablement pas propre à la chimie du solide. Les échanges se multiplient, les flux migratoires s'accroissent, les données accessibles explosent, même si, dans le même temps, le traitement des données s'améliore aussi. La société de l'information, en multipliant au-delà de l'entendement humain la quantité d'informations disponibles, provoque une perte d'identité par multiplication des références. Si l'individu et la communauté ont la possibilité de voir plus, ils sont aussi moins visibles.

Le redéploiement de la chimie du solide en une chimie plurielle – que j'ai appelée « chimie des solides » – pose la question de sa pérennité. La communauté sociale a-t-elle réussi à stabiliser une discipline scientifique ? Même s'il est difficile de répondre sans ambiguïté à cette question, plusieurs indices tendent à suggérer que non. L'institutionnalisation de la chimie du solide est faible au niveau international. Les quelques structures existantes se chevauchent, sont parfois redondantes et ne délivrent pas de message clair. Comme je l'ai déjà dit, la notoriété nationale et internationale de la chimie du solide est faible et dépasse rarement son horizon communautaire. Pas de prix Nobel, pas d'invention révolutionnaire, pas de scandale ni de menace directe, la chimie du solide est discrète dans l'arène médiatique. La mémoire collective (récit légendaire pour la France) n'a pas donné lieu à la mise en place de rites commémoratifs, qui auraient pu pérenniser son existence [Abir-Am & Elliott, 1999]. Son enseignement, est parfois recouvert par les mots d'ordre d'interdisciplinarité qui dominent la politique scientifique depuis quelques années. Au niveau national, la notoriété des fondateurs faiblit : quarante ans – le renouvellement d'une génération – ont suffi à effacer leurs traces auprès des jeunes entrants. Et ce moment précis où la mémoire d'une communauté commence à s'effacer constituait le moment opportun pour entreprendre d'en écrire l'histoire, sans préjuger de ce que sera son avenir.

« communauté scientifique pertinente » de chimie. Vue d'une sous-discipline comme la chimie du solide, sa démonstration n'est pas très convaincante. Il me semble au contraire que la spécialisation des sous-disciplines qui s'est opérée sur la période a reconfiguré l'espace académique en rendant obsolète l'unité de la chimie. Un solidiste est désormais plus proche d'un physicien des solides que d'un organicien. La chimie des gaz ou la chimie des hautes températures ont disparu de l'horizon des solidistes (alors que la chimie minérale les réunissait).

ANNEXES.

ANNEXES.....	575
<i>Visites de laboratoires.....</i>	<i>576</i>
<i>Glossaire à l'usage des non-chimistes.....</i>	<i>578</i>
<i>Sigles et abréviations utilisés.....</i>	<i>584</i>
<i>Annexes des chapitres.....</i>	<i>587</i>
A.II.1. Répartition des travaux de recherche universitaire sur les solides menés par des chimistes en 1947-1948.....	587
A.II.2. Répartition (non exhaustive) d'études chimiques (1947-1948) par laboratoire ayant un lien avec les solides.....	590
A.II.3. Principaux laboratoires français de chimie qui étudient les solides en 1950 (hors industrie).....	593
A.II.4. Classifications « familiale » et disciplinaire des collaborateurs du traité Les hautes températures et leurs utilisations en chimie.....	595
A.II.5. Liste des auteurs du colloque international des « Réactions dans l'état solide » (Paris, 1948).....	597
A.III.1. Inventaire des laboratoires en relation avec la chimie du solide (1950-2000) ..	599
A.III.2. Répartition des degrés d'oxydation pour les éléments de transition (1920-1955).....	609
A.III.1. Reconstitution (approximative) de la succession des présidents de la section chimie minérale (puis chimie du solide) du Comité national CNRS.....	610
A.IV.1. Le four à plasma : photographie (LCAES).....	611
A.IV.2. Schéma de principe d'une pile à combustibles hydrogène/oxygène.....	612
A.V.1. Communications originales de la Commission de chimie des hautes températures et des réfractaires du CNRS lors des séances internes (1956-1963).....	613
A.V.3. Organigramme du Laboratoire de l'énergie solaire vers 1970.....	617
A.VI.1. Liste chronologique des thèses françaises contenant « chimie douce » dans leur titre.....	618
A.VI.2. Carte vierge pour programme informatique (années soixante).....	620
A.VII.1. Modèle pédagogique d'une structure pyrochlore sur une paillasse (vers 1970).....	621

Visites de laboratoires.

Février à septembre 2004 : Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide (LCAES, Paris).

- Consultation des archives du laboratoire (mises en ordre par Danièle Serreau).
- Rencontre avec les membres du laboratoire : discussions informelles et/ou entretiens. Elisabeth Antic-Fidancev, Noël Baffier, Lionel Beluze, Hélène Gervais, Didier Gourier, Andrée Kahn-Harari, Hélène Mondange, Monique Perez y Jorba, Danièle Serreau, Daniel Vivien.
- Rencontre avec les enfants de Robert Collongues.

Semaine du 5 au 9 décembre 2004 : université de Bordeaux-Talence.

Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux (ICMCB).

- Consultation de thèses et d'ouvrages à la bibliothèque.
- Vaine prospection dans les sous-sols du bâtiment.
- Rencontre avec les membres du laboratoire : discussions informelles et/ou entretiens. Françoise Castex, Jean-Pierre Chaminade, Jean-Pierre Doumerc, Jean Étourneau, Paul Hagenmuller, Michel Pouchard.

Centre de recherche Paul Pascal (CRPP).

- Prospection fructueuse dans la cave du CRPP : ouvrages scientifiques du début du siècle et après.
- Discussion informelle avec Adolphe Pacault.

Journée du 3 mai 2005 : Académie des sciences (Paris).

- Rencontre et entretien avec Paul Caro.

Journée du 23 mai 2005 : Laboratoire de chimie minérale structurale (LCMS, Paris).

- Observation d'un four électrique de Moissan et du texte du prix Nobel de 1906.
- Rencontre avec les membres du laboratoire : discussions informelles et/ou entretiens. René Céolin, Jean Flahaut, Jacques Rivet.

Semaine du 6 au 9 février 2006 : Laboratoire des verres et céramiques (LVC, Rennes).

- Consultation de documents du laboratoire (société NOGS, NOGS news, photographies).
- Vaine recherche d'instruments (fours) des années soixante, soixante-dix.
- Rencontre avec les membres du laboratoire : discussions informelles et/ou entretiens. Jean-Luc Adam, Jacques Lucas, Xiang Hua Zhang.

Journée du 26 avril 2006 : Institut des matériaux de Nantes (IMN).

- Consultation de thèses et d'ouvrages à la bibliothèque.
- Rencontre avec les membres du laboratoire : discussions informelles et/ou entretiens. Serge Lefrant, Guy Ouvrard, Michel Tournoux.

Semaine du 5 au 9 juin 2006 : université Paul Sabatier à Toulouse.

Centre d'élaboration des matériaux et d'études structurales (CEMES).

- Rencontres et entretiens avec Hervé Dexpert et Jean Galy.

Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux de Toulouse (CIRIMAT).

- Accès refusé aux archives du laboratoire.
- Rencontre avec les membres du laboratoire : discussions informelles et/ou entretiens. Christine Bonino, Abel Rousset.

Journée du 16 juin et 7 juillet 2006 : Laboratoire de physique des solides (LPS, Orsay).

- Rencontres et entretiens avec Denis Jérôme et Alec Moradpour.

Journée du 5 avril 2007 : Société française de chimie (Paris).

- Rencontre et entretien avec Marie-Claude Vitorge.

Journée du 23 avril 2007 : Centre de recherches Rhône-Poulenc (Aubervilliers).

- Rencontre et entretien avec Patrick Maestro.

Journée du 7 juin 2007 : Nancy (Laxou).

- Rencontre et entretien avec Albert Hérold.

Glossaire à l'usage des non-chimistes.

CHIMIE, SYNTHÈSE

Angstrœm (Å) : unité de longueur valant 10^{-10} mètre. Elle correspond à l'ordre de grandeur d'une distance interatomique (solide ou molécule).

Atome : étymologiquement indivisible. Formé d'un noyau positif (protons et neutrons) entouré d'un nuage d'électrons (négatifs).

Calcination : opération qui modifie la structure d'un corps par chauffage.

Chimie : chaque chimie étudie des objets très différents. La chimie organique se concentre sur les molécules organiques constituées d'atomes de carbone, d'oxygène et d'hydrogène. Une molécule standard a une taille inférieure à 10^{-9} mètre (dix fois la distance interatomique). Ensuite, on trouve des objets légèrement plus gros : les complexes en solution (des ions entourés de molécules qui flottent dans l'eau) étudiés par la chimie minérale en solution. Encore plus gros, la molécule biologique comme l'ADN (dans le corps humain) et le polymère (dans les plastiques). Ce sont de très longues chaînes d'atomes liés les uns aux autres par des liaisons covalentes. Pour faire savant, on parle de macro-molécules. Plusieurs dizaines de milliers d'atomes (10^4 à 10^5) attachés les uns aux autres conduisent à des objets d'une taille typique du micromètre, 10^{-6} m, qui ne sont pas visibles à l'œil. Ces longs fils peuvent donner des liquides visqueux. Quand on passe à la taille supérieure, on tombe sur les solides, qui eux sont visibles à l'œil nu : du millimètre (10^{-3} m) au décimètre (10^{-1} m). Les solides correspondent à l'association d'un grand nombre d'atomes. Dans un gramme de solide, on trouve environ 10^{24} atomes, ce qui est gigantesque. Les solides dont je parle dans la thèse sont soit minéraux (ou ioniques) soit métalliques. Ils peuvent être ordonnés selon un réseau (cristal) ou totalement désordonné (verre ou amorphe). Un solide organique correspond quant à lui à l'association de molécules organiques alors qu'un solide minéral (ou métallique) ne contient pas de molécules mais des atomes liés les uns aux autres.

Cristallogenèse : synthèse d'un monocristal.

Électronégativité : mesure de l'affinité d'un élément pour les électrons.

Hybride : composé de deux éléments de natures différentes. En chimie, substance formée de matière organique et inorganique.

Liaison chimique : mise en commun d'électron(s) entre deux atomes. Une liaison chimique mesure environ 10^{-10} mètre (angstrœm). Dans un solide, une liaison chimique peut être ionique (polarisée) quand les deux atomes ont des électronégativités différentes (oxyde ou chalcogénure métallique) ou métallique quand les deux atomes ont des électronégativités voisines (métal ou alliage métallique). Dans une molécule (organique ou biologique), la liaison chimique est covalente.

Macroscopique, mésoscopique et microscopique : taille relative des objets les uns par rapport aux autres. En chimie est considéré comme macroscopique ce qui est à taille humaine – du

millimètre au mètre (10^{-3} à 1m) –, comme microscopique ce qui est de taille atomique – angstrœm ou nanomètre (10^{-10} à 10^{-9} m), comme mésoscopique ce qui est intermédiaire entre les deux – autour du micromètre (10^{-6} m) –. Pour un solide, le macroscopique correspond à la morphologie, le mésoscopique à la texture, le microscopique à la structure.

Molécule : assemblage de plusieurs atomes – entre deux et quelques centaines – reliés par des liaisons covalentes. Objet invisible à l'œil nu, sa taille est de l'ordre du nanomètre (10^{-9} m).

Nanoscopique : ce qui est de l'ordre du nanomètre (10^{-9} m).

Nombre d'Avogadro : il correspond au nombre d'atomes dans douze grammes de graphite, soit $6,02 \cdot 10^{24}$.

Non stœchiométrie : pour un solide de formule A_xB_y , la non stœchiométrie correspond à un rapport (x/y) irrationnel, c'est-à-dire qui ne peut-être exprimé comme un rapport de nombres entiers.

Oxydo-réduction : une réaction d'oxydo-réduction correspond à un échange d'électron(s) entre deux réactifs. Le plus électropositif ou réducteur (métal) cède un électron au plus électronégatif ou oxydant (halogène, oxyde).

Pyrolyse : étymologiquement, décomposition d'un corps sous l'action du feu. Décomposition d'un réactif en un ou plusieurs produits par chauffage.

Sel : terme désignant un précipité (phase hétérogène) dans une solution (liquide).

Trempe : refroidissement très violent (temps court et différence thermique forte) obtenu par exemple en plongeant un matériau chaud dans un fluide froid.

SOLIDES, STRUCTURES

Amorphe : est dit amorphe tout milieu dont les éléments constitutifs (atomes, molécules) ne présentent pas d'ordre au-delà de quelques angstrœms (10^{-10} m). Verre et liquide sont amorphes.

Composés isomorphes : composés chimiques différents cristallisant selon des mailles de même symétrie dont les paramètres sont proches – ce qui leur permet, après mélange, de former des cristaux mixtes (homogènes) –.

Cristal : arrangement tridimensionnel, quasi-infini, d'atomes. On distingue les monocristaux, constitué d'un seul domaine homogène de taille centimétrique, des polycristaux qui sont constitués d'une multitude de domaines cristallins micrométriques accolés les uns aux autres, de manière désordonnée.

Diagramme de phase (« diagrammes d'équilibre » avant 1950) : représentation graphique à deux ou trois dimensions figurant les domaines d'existence des phases (solide, liquide, gaz) d'un système en fonction de variables (température, pression, composition chimique). En chimie du solide, on trace des diagrammes de composition chimique en fonction de la température pour mettre en évidence les différentes structures.

Fluorine : structure cubique de formule chimique générale AF_2 (A : élément métallique ; F : fluor). Équivalente pour les halogénures métalliques de la structure pérovskite pour les oxydes.

Monocristal : solide cristallin dont la structure cristalline est continue (phase homogène). Sa taille varie du microscopique (polycristaux) au macroscopique (c'est dans ces cas-là qu'on emploie le mot).

Pérovskite : structure orthorhombique de formule chimique générale ABO_3 (A, B : éléments métalliques, O : oxygène).

Phonons : modes de vibrations du réseau atomique.

Polycristal : solide cristallin formé par l'agrégation d'une poudre (microdomaines hétérogènes).

Poudre : multiples domaines micrométriques de solides non agrégés.

Pyrochlore : structure (Fd-3m) de formule chimique générale $A_2B_2X_6X'$ (avec A= Ca, Na, Pb..., B= Nb, Ti... X=O, X'=F, OH...). Équivalente pour les halogènes de la structure spinelle pour les oxydes.

Solution solide : phase homogène de corps purs mélangés dans des proportions quelconques, en particulier non stœchiométriques (convient aux alliages métalliques).

Spinelle : structure cubique de formule chimique générale AB_2O_4 (A, B : éléments métalliques ; O : oxygène).

Transition vitreuse (T_g) : pour un verre, température au-dessous de laquelle il se solidifie et au-dessus de laquelle il devient visqueux (proche d'un liquide).

Zéolithes : aluminosilicates hydratés de structure poreuse (la taille des pores leur permet de jouer le rôle de tamis moléculaire).

INSTRUMENTS, THÉORIES

Analyse de Patterson (milieu des années 1930) : technique de calcul qui permet « d'obtenir une carte représentant la densité des vecteurs reliant entre eux les atomes diffractants dans la maille, ce qui est efficace pour les structures contenant peu d'atomes lourds qui diffractent beaucoup, mais difficile pour des protéines qui contiennent un très grand nombre d'atomes légers » [Caro, 2002, p. 9].

Analyse dilatométrique : tracé d'une courbe thermique (par chauffage) au cours du temps $y(T)=f(t)$ qui révèle des paliers correspondants aux changements de phases.

Analyse thermomagnétique : tracé d'une courbe thermique (par chauffage) et mesure simultanée de la susceptibilité magnétique.

Analyse thermique différentielle (ATD) : comparaison de la quantité de chaleur échangée avec l'extérieur pour deux échantillons (dont un témoin stable) qui permet de mettre en évidence des changements de phases pour les cristaux et des transitions vitreuses pour les verres.

Diffraction des neutrons : technique d'analyse structurale (complémentaire de la diffraction des rayons X) qui donne des informations sur la structure atomique d'un solide et ses vibrations de réseau (phonons). Les neutrons (à qui on peut associer une longueur d'onde) sont diffractés par le noyau des atomes et non par les électrons. Le CEN Saclay et l'ILL à Grenoble fournissent des sources de neutrons.

Diffraction des rayons X : technique d'analyse structurale permettant de déduire la structure d'un solide ordonné (comme un cristal), soit sous forme de poudres (méthode de Debye-Scherrer), soit sous forme de monocristal (cristal tournant).

Diagramme de Laue : ensemble de taches périodiquement réparties (dues à la diffraction des rayons X et à leurs interférences) obtenu après diffraction des rayons X. Chaque tache correspond à un ensemble de « plans d'atomes » (de l'espace réel).

Espace réciproque : représentation mathématique pratique en cristallographie, l'espace des phases est réciproque de l'espace réel. On passe de l'un à l'autre par transformée de Fourier. L'espace réciproque correspond à une représentation ondulatoire des objets (fréquentielle), duale de leur représentation corpusculaire (spatiale). Un nœud de l'espace réciproque correspond à un ensemble de plans d'atomes.

Espace réel : espace intuitif dans lequel sont disposés les objets matériels (atomes). Chaque nœud de l'espace réel correspond à un atome matériel.

Ferromagnétisme : propriété physique de certains corps à s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, et pour certains (les aimants) de garder une aimantation importante même après la disparition du champ extérieur.

Longueur d'onde (λ) : une onde électromagnétique est périodique en temps et en espace. La longueur d'onde constitue sa période spatiale. Une onde est diffractée (elle interagit) par des objets du même ordre de grandeur que sa longueur d'onde.

Lumière (onde électromagnétique) : Des ondes radio aux rayons cosmiques, la lumière est considérée en physique comme une onde électromagnétique dont le spectre est continu. Chaque type d'onde est caractérisée par une longueur d'onde λ (en mètre) ou une fréquence du signal $\nu=c/\lambda$ (où c est la vitesse de la lumière dans le vide : 300 000 km/s). À chaque longueur d'onde est associée une énergie de l'onde donnée par l'équation $E=h\nu$ ou $E=hc/\lambda$ avec $h=6,62.10^{-34}$ J.s, constante de Planck). Plus la longueur d'onde est grande, plus l'énergie associée est faible (ainsi que la température du corps qui rayonne). Des plus faibles aux plus fortes énergies, on trouve : ondes radio ($\lambda > 0,1$ m) ; micro-ondes (0,1m à 1mm) ; infrarouge (10^{-3} m à $0,8.10^{-6}$ m) ; visible ($0,8.10^{-6}$ m (rouge) à $0,4.10^{-6}$ m (violet)) ; ultraviolet (4.10^{-7} m à 10^{-9} m) ; rayons X (10^{-9} m à 10^{-12} m) ; rayons γ (10^{-12} m à 10^{-13} m) ; rayons cosmiques ($\lambda < 10^{-13}$ m). La fenêtre visible par l'œil humain se situe entre 400 et 800nm seulement (d'après les chiffres de [Atkins, 1998, p. 6]).

Micrographie : méthode d'investigation utilisant le microscope en métallurgie.

Microscopie métallographique (ou métallographie) : microscopie optique par transmission sur de fines lamelles avec utilisation des contrastes de phase. Sa précision est de l'ordre du micromètre et elle grossit quelques centaines de fois les objets.

Paramagnétisme : propriété physique de certains corps à s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique extérieur et perdre leur aimantation après la disparition du champ extérieur.

Rayonnement synchrotron : toute charge accélérée rayonne. Le rayonnement synchrotron est un rayonnement X produit à la périphérie des accélérateurs de particules. Son spectre est continu en fréquence (contrairement aux sources conventionnelles qui possèdent une ou deux longueurs d'onde) – on parle de spectre « blanc » – et son énergie est grande. Au cours des années 1970, physiciens des solides et cristallographes parasitent les anneaux dédiés à la physique des hautes énergies – DORIS à Hambourg (1973), CHESS à Cornell, DCI à Orsay (dédié depuis 1985) – puis des sources « dédiées » sont construites : SRS à Daresbury (GB) depuis 1981, Photon Factory de Tsukuba (depuis 1982), source européenne de Grenoble (1993).

Sonde de Castaing : Cet instrument a été développé lors de la thèse de Raymond Castaing au laboratoire Guinier (CNAM) vers 1950. La sonde de Castaing (nommée ainsi par les Français [Caro, 2002, p. 3]) ou « *Electron probe microanalyser* » (pour les Anglo-saxons [Bud & Warner, 1998, p. 214-216]) est un spectroscope de rayons X des solides permettant d'analyser des volumes micrométriques. Un faisceau incident d'électrons est focalisé sur un petit volume de matière qui, après interaction, émet un faisceau de photons X émergent dont l'analyse donne la composition qualitative et quantitative en un endroit précis du solide.

Théorie des bandes : théorie quantique qui examine le comportement électronique (délocalisé) des solides. Dans un solide, à cause du grand nombre d'atomes, les quelques niveaux d'énergie discrets des molécules deviennent des bandes larges. La dernière bande remplie d'électrons est la bande de valence (BV), la première bande vide est la bande de conduction (BC). L'énergie entre ces deux bandes – énergie de gap ($E_g = E_{BC} - E_{BV}$) – détermine le comportement électrique du solide. Si E_g est grande (par rapport à l'énergie d'agitation thermique), les électrons restent bloqués dans BC et n'ont pas accès à des niveaux libres : le solide est isolant. Si E_g est faible (par rapport à l'énergie d'agitation thermique), quelques électrons peuvent « sauter » dans BC et ont accès à des niveaux libres : le solide est semi-conducteur. Si E_g est nulle ou négative, tous les électrons de BV sont mobiles : le solide est conducteur.

Théorie du champ de ligands : théorie quantique qui décrit les liaisons chimiques d'un complexe de coordination, formé d'un cation métallique lié (coordonné) à des ligands (molécules, ions) dans un solvant. Par extension, cette théorie peut être appliquée pour décrire les propriétés physiques localisées (optique, magnétique) dans les solides.

APPLICATIONS

Catalyse : réaction activée par un catalyseur. Le catalyseur a seulement un rôle d'accélération (cinétique) et ne peut rendre possible une réaction qui est (thermodynamiquement) impossible sans lui.

Ferrites : oxydes mixtes de fer et d'un autre métal de structure spinelle. Leurs propriétés électromagnétiques particulières les rendent utiles pour certaines applications : mémoire magnétique et antenne électromagnétique.

Fibre optique : fil de verre ou de plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière. Elle offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau « large bande » (large fréquence) par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visio-conférence ou les données informatiques. Le principe de la fibre optique a été développé dans les années 1970 dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works.

Luminophore : étymologiquement "qui porte la lumière". Il s'agit de substances luminescentes sensibles : lorsqu'elles sont excitées par une onde ou un faisceau d'électrons, elles émettent de la lumière visible. On les dépose sur les écrans de télévision ou de systèmes de radiographie.

Piles à combustible : pile où la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation à l'anode d'un combustible réducteur (renouvelable) comme l'hydrogène couplée à la réduction à la cathode d'un oxydant comme l'oxygène de l'air.

Réfractaire : matériau ou substance qui résiste à la chaleur.

Sigles et abréviations utilisés

AC : Actions concertées (DGRST).
ACS : *American Chemical Society*.
ACO : Anneau de collision d'Orsay.
AdS : Académie des sciences.
AERE : *Atomic Energy Research Establishment* (équivalent du CEA britannique).
AFEDES : Association française pour l'étude et le développement des applications de l'énergie solaire.
AFM : *Atomic Force Microscopy* (microscopie à effet tunnel).
ANVAR : Agence nationale pour la valorisation de la recherche.
ASE : Agence spatiale européenne.
ATD : analyse thermique différentielle.
ATP : Action thématique programmée (CNRS, créée en 1971).
BDI : Bourse docteur-ingénieur (CNRS).
BnF : Bibliothèque nationale de France.
BIV : *Bulletin de l'Institut du Verre*.
BSCF : *Bulletin de la Société chimique de France*.
CdF : Collège de France.
CEA : Commissariat à l'énergie atomique.
CECA : Communauté européenne du charbon et de l'acier (1951-1956).
CEE : Communauté économique européenne (ex-CECA).
CEMES : Centre d'élaboration des matériaux et d'études structurales (Toulouse).
CEN : Centre d'études nucléaires (CEA).
CERT : Centre d'étude et de recherche de Toulouse.
CGE : Compagnie générale d'électricité (qui devient Alcatel au cours des années 1990).
CIFRE : convention industrielle de formation par la recherche (bourse de thèse).
CIRIMAT : Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux de Toulouse.
CNC : Comité national de la chimie.
CNES : Centre national des études spatiales.
CNET : Centre national d'études en télécommunications (centre de recherche des Postes et Télécommunications).
CNU : Conseil national des universités.
COMES : Commissariat à l'énergie solaire (1980-1993).
CRISMAT : Cristallographie et sciences des matériaux (Caen).
CRPHT : Centre de recherches sur la physique des hautes températures (Orléans).
CSF : Compagnie générale de télégraphie sans fil (1918-1957).
CSIRO : équivalent du CNRS australien.
DAM : Direction des applications militaires (CEA).
DCAN : Direction des constructions des armes navales.
DGA : Direction générale de l'armement (créé en 1977 pour remplacer la DMA).
DGRST : Délégation générale à la recherche scientifique et technologique (créée en 1959).
DIRD : dépense intérieure de recherche et développement.
DMA : Délégation ministérielle pour l'armement (1961-1977).
DPPB : Direction de la programmation et des prévisions budgétaires du CNRS.
DRET : Directions des recherches, études et techniques (DGA).
DRME : Direction des recherches et moyens d'essais.
DVAR : Direction de la valorisation et des applications de la recherche (1982).

EADS : *European Aeronautic Defence and Space company* (2000).
 ECP : École centrale des arts et des manufactures de Paris.
 EDF : Électricité de France.
 ENS : École normale supérieure.
 ENSC : École nationale supérieure de chimie (ex-IC).
 ENSCIL : École nationale supérieure de céramique industrielle de Limoges.
 ENSCP : École nationale supérieure de chimie de Paris.
 ENSEE : École nationale supérieure d'électrochimie et électrometallurgie (Grenoble).
 ENSIC : École nationale supérieure des industries chimiques (Nancy).
 ENSM : École nationale supérieure des Mines.
 ENSMIM : École nationale supérieure de métallurgie et de l'industrie des Mines (Nancy).
 ESA : *European Space Agency*.
 ESCM : École supérieure de chimie de Mulhouse.
 ESO : *European Southern Observatory* (La Silla, Chili).
 EXAFS : *Extended Absorption Fine Structure*.
 FcS : faculté catholique des sciences.
 FdP : faculté de pharmacie.
 FdS : faculté des sciences.
 GFEC : Groupe français d'étude des carbones.
 GIS : Groupement d'intérêt scientifique (CNRS, créé en 1976).
 GRECO : Groupement d'études coopératives (CNRS, créé en 1976).
 IC : Institut de chimie (ENSC après 1948).
 ICMCB : Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux.
 ICMCM : Institut de chimie de la matière condensée et des matériaux (Montpellier).
 ICSN : Institut de chimie des substances naturelles.
 IFP : Institut français du pétrole.
 IMN : Institut des matériaux de Nantes.
 IMP : Institut de science et de génie des matériaux et procédés de Perpignan.
 INPG : Institut national polytechnique de Grenoble.
 INRA : Institut national de la recherche agronomique.
 INSA : Institut national des sciences appliquées.
 INSTN : Institut national des sciences et techniques nucléaires.
 IPCMS : Institut de physique et de chimie des matériaux de Strasbourg.
 IRC : Institut de recherche sur la catalyse (Lyon).
 IREM : Institut de réactivité, électrochimie et microporosité (Versailles).
 IRSID : Institut de recherche en sidérurgie.
 ISNOG : *International Symposium on Non-Oxides Glasses*.
 IUPAC : Union internationale de chimie pure et appliquée.
 IUF : Institut universitaire de France.
 JMA : Journées métallurgiques d'automne.
 LCA : Laboratoire central de l'armement.
 LCM : Laboratoire de chimie minérale.
 LCMC : Laboratoire de chimie de la matière condensée (Paris).
 LCMI : Laboratoire de chimie des matériaux inorganiques (Toulouse).
 LCMS : Laboratoire de chimie minérale et structurale.
 LCS : Laboratoire de chimie du solide (Bordeaux).
 LCSCE : Laboratoire central des services chimiques de l'État (ex-Laboratoire des poudres).
 LCTC : Laboratoire central des traitements chimiques (Vitry-sur-Seine).
 LCTS : Laboratoire des composés thermo-structuraux (Bordeaux).
 LCUFPR : Laboratoire central de l'Union française des produits réfractaires.

LEPM : Laboratoire d'électrostatique et de physique du métal (Grenoble).
 LES : Laboratoire de l'énergie solaire (Laboratoire de l'énergétique solaire après 1976).
 LHT : Laboratoire des hautes températures (Paris).
 LMPM : Laboratoire des matériaux et procédés membranaires (Montpellier).
 LPMC : Laboratoire de physique de la matière condensée (Palaiseau).
 LRBA : Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (Vernon).
 LRCS : Laboratoire de réactivité et de chimie du solide (Amiens).
 LSPES : Laboratoire de structure et propriétés de l'état solide (Lille).
 LTR : Laboratoire des terres rares (Bellevue).
 LUR : Laboratoire des ultra-réfractaires (Montlouis).
 LURE : Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique (Orsay).
 ME : microscopie électronique.
 MEB : microscopie électronique à balayage.
 MET : microscopie électronique à transmission.
 MPG : *Max Planck Gesellschaft*.
 MPI : *Max Planck Institut*.
 MRS : *Materials Research Society*.
 MST : Mission scientifique et technique.
 NBS : *National Bureau of Standards*.
 NRL : *Naval Research Laboratories* (US Army).
 NTT : *Nippon Telegraph and Telecom*.
 OCDE : Organisme de coopération et de développement économiques (ex-OECE).
 OECE : Organisation européenne de coopération économique (1948-1961).
 ONERA : Office national des études et recherches aéronautiques.
 PCB : physique, chimie, biologie (filière universitaire).
 ppm : partie par million, soit 0,0001%.
 PIRMAT : Programme interdisciplinaire de recherche sur les matériaux du CNRS.
 RADC : *Rome Air Development Center* (USAF).
 RCP : Recherche coopérative sur programme (CNRS, 1963-1970).
 RMN : Résonance magnétique nucléaire.
 RIHTR : *Revue internationale des hautes températures et des réfractaires* (1964-1995).
 RPE : résonance paramagnétique électronique.
 SCF : Société chimique de France (1857-1983).
 SFC : Société française de chimie (ex-SCF).
 SFM : Société française de métallurgie (1945-1990).
 SF2M : Société française de métallurgie et des matériaux (ex-SFM).
 SNCF : Société nationale des chemins de fer.
 STL : *Standard Telecommunication Laboratories Ltd* (UK).
 STEM : *Scanning transmission electron microscopy*.
 STM : *Scanning tunneling microscopy*.
 SUDOC : Système universitaire de documentation.
 UE : Union européenne (ex-CEE).
 UER : unité d'enseignement et de recherche.
 UIC : Union internationale de chimie.
 UMR : unité mixte de recherche (CNRS).
 UPR : unité propre de recherche (CNRS).
 URA : unité de recherche associé (CNRS).
 USAF : *US Air Force*.
 YAG : *yttrium aluminium garnet*.

Annexes des chapitres

A.II.1. Répartition des travaux de recherche universitaire sur les solides menés par des chimistes en 1947-1948*

Spécialités (affinités)	Laboratoire (établissement)	Nom du chercheur responsable et grade	Enoncé du travail	Divers
Chimie minérale				
(analyse minérale)	Chimie industrielle (FdS Clermont-Ferrand)	Remy-Gennete P. (P)	Extension du dosage de la magnésie en milieu anhydre	
	Chimie C (FdS Paris)	Wormser Y. (Mlle) (CR)	La dissimulation des métaux par les acides et par les amines	
(préparation et propriétés)	Chimie nucléaire (CdF)	Stie Pierre (MR)	Préparations minérales sur de très petites quantités. Chimie des radioéléments.	Lien Chaudron
	Chimie minérale (FdS Paris)	Besson J. (CR)	Préparation du glucinium	
	Chimie minérale (faculté de pharmacie, Paris)	Neudorffer J. (AR)	Fluor et dérivés	Laboratoire Lebeau
	Chimie minérale (faculté de pharmacie, Paris)	Morette André (MR)	Chimie du vanadium, du molybdène, du tungstène ; notamment halogénures de vanadium	Laboratoire Lebeau
	Chimie minérale (faculté de pharmacie, Paris)	Flahaut Jean (AR)	Sulfure de manganèse. Fluorures des métaux de terres rares.	Laboratoire Picon-Lebeau
	Chimie minérale (FdS Rennes)	Rohmer Raymond (MC)	Préparation des bromures anhydres à partir des oxydes ; perbromures. Composés bromés du soufre et du carbone. Etude comparative des différentes méthodes de bromuration et de chloruration	Elève Chrétien
			Préparation du glucinium par voie électrolytique	
	Chimie minérale (FdS Rennes)	Prigent Jacques (A)	Différentes méthodes de préparation des bromures anhydres à partir des oxydes.	Laboratoire Rohmer
	Chimie C (FdS Paris)	Peschanski (Mme) (AR)	Polysulfures de sodium	
	Chimie I PCB (FdS Paris)	Pannetier G. (A)	Préparation de l'acide phosphorique à partir des phosphates naturels	
	Chimie générale (FdS Paris)	Kantzer D. (Mlle) (AR)	Etude des méta- et polyphosphates	
	Chimie (ENSM Paris)	Jolibois Pierre (P)	Chimie des silicates et des phosphates	

* La classification est basée sur [CNRS, 1949b ; 1949c].

	Chimie (ENSM Paris)	Boulle A. (CT)	Recherches sur des déshydratations : phosphates alcalins et alcalinoterreux, acide phosphorique. Préparation de métaphosphates et étude par spectrographie infra-rouge	Laboratoire Jolibois
	Chimie (ENSM Paris)	Jary R. (A)	Mélanges binaires $P_2O_5-SiO_2$	Laboratoire Jolibois
	Chimie (ENSM Paris)	Nicol A. (CT)	Etude de silicates. Action de la chaleur sur les sels de plomb	Laboratoire Jolibois
	Chimie générale (ENSC, Strasbourg)	Vermeillet (Mlle)	Réfractaires silico-alumineux fondant à très haute température	Forestier
	Chimie (Ecole française de papeterie de Grenoble)	Chene M. (directeur-adjoint)	Recherches sur le chlorite de sodium : préparation électrolytique, utilisation pour le blanchiment. Nouvelles recherches sur les aluminates et leurs utilisations papetières	
	LCSCCE, Paris	Longuet J. (Mlle) (CR)	Synthèse de silicates de nickel, magnésium et cobalt à structure kaolinitique. Obtention d'aluminates nouveaux, par réactions dans l'état solide, à la température ordinaire. Etudes aux rayons X	
	Hautes températures (ENSCP)	Foex Marc (CR)	Propriétés des oxydes et composés réfractaires. Terres rares	Laboratoire Trombe
	Chimie organique (FdS Poitiers)	Nortz M.	Etude des chromates de zinc comme pigments anti-corrosifs sur le fer, le magnésium, l'aluminium et leurs alliages	
	Chimie (Institut catholique de Toulouse)	Rivenq F. (AR)	Action des phosphates et des carbonates sur les sels de vanadium ; phosphates de vanadyle	
	Institut du Radium (annexe Arcueil)	Rachelet (MC)	Propriétés chimiques des composés de l'uranium	
	Chimie minérale (FdS Toulouse)	Masdupuy (AR)	Recherches sur la constitution des nitrures, phosphures et carbures métalliques	Laboratoire Gallais (complexes)
	Chimie minérale (FdS Toulouse)	Voigt D.	Effet Faraday et structure : thiocyanates, acide thiocyanique, sulfites, phosphites, acides phosphoreux, nitrites	
	Rayons X (CNRS Marseille)	Michaud R.A. (chef de laboratoire)	Etude aux rayons X des transformations thermiques des minéraux argileux et des fractions argileuses des sols méditerranéens	
	Institut Fourier (Grenoble)	Lewy-Bertaut E. (AR)	Transformations ordre-désordre dans les mixtures Fe-Pt, Co-Pt, Ni-Pt ; anomalies cristallographiques du cobalt. Structure de ferrites	Aussi placé en chimie générale et physique : « état colloïdal et états dispersés »
Chimie générale et chimie physique				

(appareillage, techniques générales)	Chimie minérale (faculté de pharmacie, Paris)	Lebeau Paul (P)	Chimie des hautes températures. Pyrogénéation	
	Chimie minérale (faculté de pharmacie, Paris)	Flahaut Jean (AR)	Mise au point d'un nouveau type de four à induction à vide	Laboratoire Picon-Lebeau
	ENSCP	Foex Marc (CR)	Hautes températures et énergie solaire	
	Chimie industrielle (FdS Clermont-Ferrand)	Remy-Gennete P. (P)	Préparation des sels anhydres purs par distillation dans le vide	
	Chimie C (FdS Paris)	Brefort (AR)	Thermolyse des solides	
(équilibres)	Enseignement chimie (FdS Paris)	Souchay P. (CR)	Phénomènes de condensation en chimie minérale	Aussi en électrochimie
(cinétique chimique)	Chimie organique (FdS Poitiers)	Amiel Jean (P)	Cinétique de l'oxydation de divers hydrocarbures	
	ENSC Strasbourg	Forestier Hubert (P), (dir. ENSC)	Réactions entre solides : phénomènes d'adsorption ; physicochimie des surfaces solides ; préparation et étude des composés ferromagnétiques. Influence des transformations du 2 ^e ordre sur les réactions chimiques (applications aux phénomènes de cémentation, de nitruration, etc...) Cristallochimie, microscopie électronique (Variations de température des préparations dans le faisceau électronique)	Elève de Chaudron
	Chimie (FdS Lyon)	Bénard Jacques (MC)	Constitution des oxydes métalliques. Réactions dans l'état solide. Cinétique de l'oxydation superficielle des métaux	Elève de Chaudron
Métallurgie				
(sidérurgie)	Métallurgie générale (Institut de chimie appliquée, Lille)	Michel André (P)	Action de l'hydrogène sulfuré sur les oxydes de fer. Désulfuration des cendres de pyrites. Propriétés magnétiques et structurales des oxydes de fer, notamment Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ -TiO ₂ . Liaison dilatométrique entre les différents oxydes de fer. Etude thermomagnétique de la cémentite et de cémentites complexes	Elève de Chaudron
(métaux non ferreux)	Terres rares (Bellevue)	Mahn F. (Mlle) (AR)	Recherches sur les alliages de métaux de Terres Rares avec divers métaux communs, notamment alliages Gd-Mg, riches en Gd : préparation, mesure des points de Curie	Laboratoire Trombe
	Rayons X (LCSCE, Paris)	Frisby H. (AR)	Oxydation du cuivre ; orientation des minces pellicules d'oxyde sur le cuivre. Recherches effectuées à l'aide d'un analyseur électronique	

A.II.2. Répartition (non exhaustive) d'études chimiques (1947-1948) par laboratoire ayant un lien avec les solides*

Laboratoire (établissement)	Nom du chercheur responsable (grade)	Enoncé du travail	Sous-disciplines (affinités)
Chimie (ENSM Paris)	Jolibois Pierre (P)	Chimie des silicates et des phosphates	Chimie minérale (préparation et propriétés)
	Boulle A. (CT)	Recherches sur des déshydratations : phosphates alcalins et alcalinoterreux, acide phosphorique. Préparation de métaphosphates et étude par spectrographie infra-rouge	
	Jary R. (A)	Mélanges binaires $P_2O_5-SiO_2$	
	Nicol A. (CT)	Etude de silicates. Action de la chaleur sur les sels de plomb	
Chimie C (FdS Paris)	Wormser Y. (Mlle) (CR)	La dissimulation des métaux par les acides et par les amines	Chimie minérale (analyse minérale)
	Peschanski (Mme) (AR)	Polysulfures de sodium	Idem (préparation et propriétés)
Chimie industrielle (FdS Clermont-Ferrand)	Remy-Gennete P. (P)	Extension du dosage de la magnésie en milieu anhydre	Chimie minérale (analyse minérale)
		Préparation des sels anhydres purs par distillation dans le vide	Chimie générale et chimie physique (appareillage, techniques générales)
Chimie minérale (faculté de pharmacie, Paris)	Lebeau Paul (P)	Chimie des hautes températures. Pyrogénéation	Chimie générale et chimie physique (appareillage, techniques générales)
		Analyse des gaz	Chimie minérale (analyse minérale)
	Morette André (MR)	Chimie du vanadium, du molybdène, du tungstène ; notamment halogénures de vanadium	Idem (préparation et propriétés)
	Neudorffer J. (AR)	Fluor et dérivés	
	Flahaut Jean (AR)	Sulfure de manganèse. Fluorures des métaux de terres rares.	

* Classification à partir de [CNRS, 1949b-c].

		Mise au point d'un nouveau type de four à induction à vide	Chimie générale et chimie physique (appareillage, techniques générales)
Chimie minérale (FdS Toulouse)	Gallais F. (P)	Nitrites de cuivre. Nature et stabilité de complexes imparfaits dissous (thiocyanates, thiosulfates). Conductibilité à l'état fondu et constitution des nitrures, phosphures, carbures. Détermination de structures par des mesures de pouvoir rotatoire magnétique : acides minéraux, peroxydes, peroxyacides ; étude particulière de la covalence de coordination	Chimie minérale (préparation et propriétés)
	Masdupuy (AR)	Recherches sur la constitution des nitrures, phosphures et carbures métalliques	
	Voigt D.	Effet Faraday et structure : thiocyanates, acide thiocyanique, sulfites, phosphites, acides phosphoreux, nitrites	
Chimie organique (FdS Poitiers)	Amiel Jean (P)	Cinétique de l'oxydation de divers hydrocarbures	Chimie générale et chimie physique (cinétique chimique)
	Nortz M. (?)	Etude des chromates de zinc comme pigments anti-corrosifs sur le fer, le magnésium, l'aluminium et leurs alliages	Chimie minérale (préparation et propriétés)
Hautes températures (ENSCP)	Foex Marc (CR)	Hautes températures et énergie solaire	Chimie générale et chimie physique (appareillage, techniques générales)
		Propriétés des oxydes et composés réfractaires. Terres rares	Chimie minérale (préparation et propriétés)
Institut Fourier (Grenoble)	Lewy-Bertaut E. (AR)	Transformations ordre-désordre dans les structures Fe-Pt, Co-Pt, Ni-Pt ; anomalies cristallographiques du cobalt. Structure de ferrites	Chimie minérale (préparation et propriétés)
		Etat colloïdal et états dispersés	Chimie générale et physique
LCSCCE, Paris	Longuet J. (Mlle) (CR)	Synthèse de silicates de nickel, magnésium et cobalt à structure kaolinitique. Obtention d'aluminates nouveaux, par réactions dans l'état solide, à la température ordinaire. Etudes aux rayons X	Chimie minérale (préparation et propriétés)
	Frisby H. (AR)	Oxydation du cuivre ; orientation des minces pellicules d'oxyde sur le cuivre. Recherches effectuées à l'aide d'un analyseur électronique	Métallurgie (métaux non ferreux)

ENSC, Strasbourg	Forestier Hubert (P), (dir. ENSC)	Réactions entre solides : phénomènes d'adsorption ; physicochimie des surfaces solides ; préparation et étude des composés ferromagnétiques. Influence des transformations du 2 ^e ordre sur les réactions chimiques (applications aux phénomènes de cémentation, de nitruration, etc...) Cristallochimie, microscopie électronique (Variations de température des préparations dans le faisceau électronique).	Chimie générale et chimie physique (cinétique chimique)
	Vermeillet (Mlle)	Réfractaires silico-alumineux fondant à très haute température	Chimie générale
Chimie minérale (FdS Rennes)	Rohmer Raymond (MC)	Préparation des bromures anhydres à partir des oxydes ; perbromures. Composés bromés du soufre et du carbone. Etude comparative des différentes méthodes de bromuration et de chloruration	Chimie minérale (préparation et propriétés)
		Préparation du glucinium par voie électrolytique	
	Prigent Jacques (A)	Différentes méthodes de préparation des bromures anhydres à partir des oxydes.	

A.II.3. Principaux laboratoires français de chimie qui étudient les solides en 1950 (hors industrie).*

Laboratoires (^{CNRS} =rattaché au CNRS)	Directeur (sous-dir.)	Date de création	Lieu (nombre de chercheurs)	Nature des composés solides**	Lien famille scientifique
Chimie minérale	Lebeau Paul	1895	Paris, FdP (>3)	M, MO, MX, MS (transition)	Moissan
Chimie générale et analytique	Jolibois Paul	1921	Paris, ENSM (>4)	Phosphates, silicates, (P ₂ O ₅ -SiO ₂) électrolyse.	Moissan puis Lebeau
Services chimiques de l'Etat	Longuet J. (Mlle)	?	Paris (?)	Silicates de Ni, Mg, Co Aluminates Cu → CuO	Laboratoire des poudres
Chimie minérale	Hackspill Louis	1933	Paris, FdS	M (alcalins et alcalino-terreux), B, acide phosphorique et phosphates	Moissan
Chimie	Forestier Hubert	> 1928 < 1939	Strasbourg, ENSCS	MO (Fe), ferrites	Chaudronnerie
Chimie minérale (structurale)	Picon Marius	< 1939	Paris, FdP (3)	MS (terres rares et transition)	Lebeau
Chimie	Aubry Jacques	< 1940	Nancy, FdS	magnétisme	Weil
Laboratoire central des traitements chimiques ^{CNRS} (LCTC)	Chaudron Georges (Moreau Léon)	1939	Vitry-sur-Seine (17)	M et MO (Fe, Al)	Chaudronnerie
Chimie minérale	Rohmer Raymond	> 1942	Rennes, FdS	MO → M-Br, S, C glucinium	Chrétienté (1939 : sulfates Ni et Co)
Chimie industrielle et minérale	Pâris René	<1944	Lyon, FcS	?	?
Chimie	Letort M.	< 1944	Nancy, ENSIC	C, oxydation	?
Rayons X	Bertaut Félix	1945	Grenoble, Institut Fourier	Fe-Pt, Co-Pt, Ni-Pt, Co, ferrites	LCSCCE
Chimie minérale	Michel André	1945 à 1960	Lille, ENSCL	MO, MS, magnétisme	Chaudronnerie
Terres rares ^{CNRS} ou Georges Urbain	Trombe Félix	1945 à 1977	Bellevue (>4)	Terres rares	Urbain
Hautes températures	Foëx Marc	1945 à 1950	Paris, ENSCP	Réfractaires	Trombe

* La classification est basée sur un large éventail de sources et sur leur confrontation : [CNRS, 1949a-c], [Lebeau, 1950], [ONUÉF, 1956], [MIN, 1966a], [Pestre, 1990], les dossiers personnels de l'Académie des sciences et certaines interviews orales. Elle ne prend en compte ni les laboratoires de chimie des sels en solution, ni ceux de radiochimie. Les chiffres et indications qui sont données le sont pour 1950 sauf si le contraire est mentionné. Les laboratoires sont classés par date de création croissante et par ordre alphabétique pour ceux dont j'ignore la date de création.

** Les recherches hors solide que les laboratoires peuvent mener ne sont pas systématiquement mentionnées. L'éventuelle parenthèse indique les métaux les plus étudiés dans le laboratoire (ce ne sont pas forcément les seuls métaux étudiés).

Chimie	Cueilleron Jean	1946	Mulhouse, ENSCM	B, Al	Hackspill
Chimie industrielle	Remy-Gennete P.	< 1950	Clermont-Ferrand, FdS	Magnésie, sels anhydres	?
Chimie minérale	Gallais Fernand	< 1950	Toulouse, FdS (>3)	M-N, P, C Solution : sels et complexes	?
Chimie minérale	Besson Jean	< 1950	Paris, FdS	Glucinium	?
Chimie organique	Amiel Jean	< 1950	Poitiers, FdS (>2)	Cr-Zn sur Fe, Mg, Al. C _n H _{2n+2}	?
Utilisation de l'énergie solaire <i>CNRS</i>	Trombe Félix	1950	Mont-Louis	Synthèse HT	Trombe

A.II.4. Classifications « familiale » et disciplinaire des collaborateurs du traité* Les hautes températures et leurs utilisations en chimie

ancêtre	1 ^e génération	2 ^e génération
	Chevenard P. [v.1,2,3]** / AdS, Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville (ex-coll. de Le Chatelier)	
Le Chatelier H. (9)	Dupuy E. (<1910) [xxiii] / Bureau de normalisation de la sidérurgie	
	Oswald M. (1908-13) [xi] / Le Carbone-Lorraine	
	Chaudron G. (1913-21) [vi, xvi] / LCTC	Waché X. (1922-26) [v.1,2,3] / coll. Chevenard
	Laffitte P. (1920-25) [i] / prof. Paris	Moreau L. (1938) [vi, xvi] / LCTC Bénard J. (1939) [vii, xx] / MdC Lyon
		Fréling M. N. [i] / coll. Laffitte
		Jolibois P. (1905-10) [xii] / AdS, prof. Mines (ex-élève Le Chatelier et Lebeau)
Moissan H. (7)	Lebeau P. (1900-06) / prof. (pharmacie) Paris, AdS	Damiens A. (†1950) [x] / doyen faculté de pharmacie
		Picon M. (1910-19) [xv] / prof. (pharmacie) Paris
		Morette A. (1928-37) [x] / MdC (pharmacie) Paris
	Hackspill L. (1903-11) [iv] / prof., dir. ENSCP, AdS	Cueilleron J. (>1945) [iv, xxxi] / prof. Chimie Mulhouse
Urbain G. (3)		Trombe F. (1928-35) [iii, xiii, xxvi à xxix] / LTR
		Foëx M. (1932-39) [xx, xxvi à xxx, table] / LHT et Montlouis
		Berton A. (1939) [table] / coll. Lebeau à la mort d'Urbain
Disciplines		
Hautes températures	Ribaud G. (1911-19) [ix, xviii, xxxii] / prof. Paris, AdS	Manson M. N. [i] / coll. Laffitte
		Peychès Y. (1930-36) [xxxiii] / Saint-Gobain, Institut du Verre
Minéralogie	Michel-Levy A. (1900-08) [ii.2] / prof. Paris, AdS	Muraour H. [ii.1] / ingénieur des poudres

* Le tableau est construit suivant quelques règles simples visant à classer les collaborateurs du traité. Le but est de grouper les « chimistes » suivant trois familles scientifiques, définies par l'ancêtre commun (Le Chatelier, Moissan, Urbain), et de répartir les autres collaborateurs suivant leur discipline. Chaque chimiste d'une famille est repéré par son maître de thèse avec deux exceptions notoires : Chevenard, classé avec Le Chatelier, parce qu'il a été son collaborateur plus que son disciple [Letté, 2004, p. 191 ; Chezeau, 2004, p. 75] et Jolibois, classé avec Lebeau qui l'a encadré en thèse, mais au sein du laboratoire Le Chatelier. Grosso modo, on peut repérer une 1^e et une 2^e génération suivant la date de thèse (indiquée entre parenthèses). Les non chimistes plus âgés (équivalents de la 1^e génération) sont classés suivant la discipline à laquelle ils se rattachent (références à leur carrière : chaire, industrie, conseil...). Leurs collaborateurs plus jeunes sont placés comme équivalents à la 2^e génération. En outre, pour chaque individu sont donnés le numéro des chapitres rédigés [entre crochets] et leur emploi aux environs de 1950.

** Entre crochets sont indiqués les chapitres rédigés par chacun.

	Wyart J. [xx] / prof. Paris	
Céramique	Brémond P. [xxi] / prof. Ecole de Céramique (Sèvres)	
	Letort M.-Y. [xxii, xxx, xxxiv] / MdC Ecole Centrale puis dir. du Centre National d'Etudes et de Recherches Céramiques	Halm L. [xxx] / dir. LCUFPR, conseil Service technique de l'Aéronautique (ex-assistante Léon Guillet au CNAM)
Verres	Long B. (ens, 1921) [xxiv] / Saint-Gobain	
	George H. [xvii] / Prosilis	Bouchet G. [xix] / Prosilis
Electronique	Descarsin M. [xiv] / Compagnie des Lampes, conseil Thomson	
Electrochimie	Andrieux J.-L. (1929) [viii] / prof. Grenoble	
Géophysique	Maillet R. (X, 1922) [xxv] / Société de recherches et d'entreprises industrielles	

A.II.5. Liste des auteurs du colloque international des « Réactions dans l'état solide » (Paris, 1948).*

Pays	Ville	Participants	Sujet de la communication (nombre si plus d'une)	Méthodologie utilisée
Belgique	Liège	Dallemagne M. J., Brasseur H.	Apatites (2)	Synthèse
États-unis	Evanston	Selwood P. W.	Catalyseurs (structure, induction de valence)	
	Washington	Laidler K. J.	Adsorption	Cinétique (théorique)
France	Paris (chimie générale)	Brusset H.	Graphitisation	RX
	Lille (chimie appliquée)	Michel A.	Substitution des oxydes de fer (magnétite)	thermomagnétisme
	Paris (chimie métallurgique)	Bénard J.	Oxydation métaux + protoxyde (2)	Cinétique, orientation, composition, diagramme de phase
		Chaudron G. Avec Bénard + Wallaëys + Faivre, Pruna	Décomposition protoxyde + synthèse apatite + transformations aragonite-calcite et vaterite-calcite (3)	Thermomagnétique, micrographie, cinétique par dilatométrie
		Faivre R.	Oxydes de plomb (solution solide)	Etude chimique, RX
	Paris (cristallographie CNAM)	Guinier A.	Structures imparfaitement périodiques (lamellaire, feuillet)	Diffusion RX
	Paris (minéralogie)	Wyart J.	Synthèse de silicates, cristallisation	Microscopie optique
	Paris (physique)	Darmois E.	Pénétration de H dans le fer	
	Paris (radioactivité)	Daudel R.	Radioindicateurs	
	Paris (services chimiques de l'Etat)	Escard-Longuet J. (Mme)	Oxydes et sulfures à basse température	RX
		Matthieu Marcel	Polymères organiques	RX
	Strasbourg	Foëx G.	MFe (avec M=S, Se, Te)	Magnétisme (coefficient d'aimantation)
Strasbourg (chimie générale)	Forestier H. + Escard-Longuet J. (Mme) + Nury G.	Etat surface à basse température + cémentation du fer	Magnétisme	

* Le tableau est construit d'après les actes du colloque [CNRS, 1949d].

Grande-Bretagne	Bristol (chimie)	Garner W. E. Gray T. J.	Réduction film d'oxyde de cuivre	Cinétique par résistance électrique
	Bristol (physique)	Mott N. F.	Oxydation des métaux	Théorie [$v=f(t,T)$], adhérence, orientation, structure
	Harpenden (pédologie)	Mac Ewan D. M. C.	Adsorption interlamellaire	Synthèse et RX
	Leeds (physique)	Brindley G. W.	Mélange de phases	dosage par RX
	Londres	Barrer R. M.	Echanges d'ions	Cinétique, thermodynamique, statistique
Italie	Milan (chimie industrielle)	Natta G.	Catalyseurs (rôle et vieillissement)	
	Milan (chimie physique et électrochimie)	Piontelli	Sulfures et solutions électrolytiques	Electrochimie
Norvège	Oslo-Blindern (chimie)	Gleditsch E. (Mlle)	Echanges d'ions dans les sels solides	Marquage radioactif (deutérium)
Pays-Bas	Eindhoven (Philips)	Verwey E. J. W.	Céramiques, cations dans spinelles	
Suède	Stockholm	Borelius G.	Transformations	Cinétique (RX, calorimétrie, optique, électrique)
	Uppsala (chimie)	Hägg Gunner	Lamellaires + iodure de cadmium (2)	
Suisse	Berne (chimie)	Feitknecht W.	Composés lamellaires	Cinétique par pH, optique
		Huber K.	Croissance pellicules anodiques (Al, Zn)	Electrochimie, structure

A.III.1. Inventaire des laboratoires en relation avec la chimie du solide (1950-2000)*

Laboratoires (^{LP} : propre)	Directeur [effectif permanent / % chimie minérale]	[Annuaire] et/ou dates plus précises	Lieu, établissement	Spécialités (principalement éléments étudiés)	Liens divers (filiation, mutation, collaboration)
Chimie	Fernand Marion [6]	< 1960 (1962) (1964) [1966]	Amiens, CSU	MO (réduction ferrites Mg et Ni) (UO _{2+x})	1 publication avec Aubry
Réactivité et chimie des solides (LRCS), URA 1211 [ESA 6007]	Michel Figlarz [Jean-Marie Tarascon]	[1992] [2000]	Amiens, Picardie (Nord)		Amiel [Tarascon : élève de Hagenmuller]
Terres rares ^{LP} ou Georges Urbain	Félix Trombe (1945-1969)	1945 [1949]	Bellevue (campus CNRS)	TR	Urbain
Recherches sur les terres rares ^{LP}	Trombe [11]	[1966]	Bellevue (Meudon)	Ferrites, sélénures, tellures, halogénures	Urbain
Recherches sur les terres rares ^{LP} (3 équipes : Loriers, Achard, Caro)	Jean Loriers (sous-dir. Caro) (100 avant la coupure)	[1975]	Bellevue (Meudon)		Trombe
Chimie métallurgique des terres rares (LCMTR), UPR 209	Jean-Claude Achard [Annick Percheron- Guegan]	1977 [1992] [2000]	Bellevue (Meudon) puis Thiais (1998)		Trombe
Eléments de transition dans les solides, UPR 210	Paul Caro [Gérard Schiffmacher (1989-93)]	1977 [1992] fin 1993	Bellevue (Meudon) Intégration UPR 209 (1993-98) puis LCAES (1998) à l'ENSCP		Trombe
Physico-chimie des matériaux (LPCM), UPR 211	Jean Loriers [Bernard Blanzat (DR)]	1977 [1992] [2000]	Bellevue (Meudon) puis Ecole Centrale de Paris		Trombe
Chimie minérale puis [chimie minérale et structurale (1966- 74)] puis [Chimie du solide ^{LP} (1974- 1995)]	Paul Hagenmuller (1961-88) (19 en 1961 ; 33 en 66 ; 60 en 69) [Jean Etourneau (1988-95)]	1960-61 [1961] [1966] [1975] [1992]	Bordeaux, FdS	Oxydes...	Chrétien

* Basé sur les Annuaire du CNRS 1949, 1956, 1961, 1975, 1992, 2000, l'Annuaire de la recherche universitaire 1966 (indiqués par [date]) et des informations plus ponctuelles extraites des rapports d'activité du CNRS, des interviews ou d'autres documents.

Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux ^{LP} , UPR 9048	Jean Etourneau (1995-2004)	1995 [2000]	Bordeaux 1, Talence (Aquitaine et Poitou Charentes)	MO, MX, M...	Hagenmuller
Composites thermostructuraux (LCTS), UMR 47 [UMR 5801]	Roger Naslain	[1992] [2000]	Bordeaux 1, Pessac [Talence]	Propriétés mécaniques	Hagenmuller [+ section 9]
Chimie	N'Lozach (prof) [20 / 33%]	[1956]	Caen, FdS (nouvelle université reconstruite 1948-1957)	Minérale (1/3), rayons X	?
Chimie minérale	Alfred Deschavres (6)	(1963) [1966]	Caen, FdS	Réactions en phase solide à HT	Deschavres termine sa thèse en 1959 avec Chrétien
Cristallographie et chimie du solide	Jean-Claude Monnier et Maurice & Bernard (y sont en 1963)	[1975]	Caen	MO	Deschavres passe la main ? vivant 1981 (président section chimie du solide de la SFC)
Cristallographie et sciences des matériaux (CRISMAT), URA 1318 [UMR 6508]	Bernard Raveau (prof)	[1992] [2000]	Caen, ISMRA (Normandie)		Deschavres [+ sections 6, 5]
Etudes et recherches sur les matériaux (LERMAT), URA 1317 [FRE 2149]	Nouet [Richard Rizk (CR)]	[1992] [2000]	Caen, ISMRA (Normandie),		? [+ section 9]
Chimie physique du solide par diffraction très précise des rayons X, URA 453	Dominique Weigel	[1992]	Châtenay-Malabry, ECP (IdF S)		
Structures, propriétés et modélisation des solides, UMR 8580	Gilbert Calvarin (DR)	[2000]	Châtenay-Malabry, ECP (IdF S)		Lien avec le précédent ?
Chimie industrielle [Chimie minérale I]	Paul Remy-Genneté (4/50%) (6/60%)	1949 < 1961 [1961] [1966]	Clermont-Ferrand, FdS	Synthèse de sels [Réactions état solide]	?
Groupe de cristallographie et de chimie des solides, URA 444	Jean-Claude Cousseins (prof en 1973)	< 1973 [1992]	Clermont-Ferrand 2, Aubière (63) (Centre)		Chrétien (thèse après 1951) Lien avec le laboratoire de 1966 ?
Matériaux inorganiques, ESA 6002	André Hamwi (prof)	[2000]	Clermont-Ferrand 2, Aubière (63) (Centre)		Lien avec le laboratoire de 1992 ?
Rayons X	Bertaut Félix	1945 [1949]	Grenoble, Institut Fourier	Fe-Pt, Co-Pt, Ni-Pt, Co, ferrites [ordre-désordre alliages]	LCSCE
Métallurgie et électrochimie [Thermodynamique et Physico-Chimie]	Etienne Bonnier (prof) [15]	[1961] [1966]	Grenoble, ENSEE		?

Métallurgiques, 1966]					
Chimie minérale et électrochimie	Jean Besson (18/20%)	1962 [1966]	Grenoble, FdS et ENSEE	HT, C, piles à combustibles solides	Thèse chez Hackspill comme Herold
Etudes structurales des matériaux	Robert Fruchart	[1975]	Grenoble		Thèse avec Michel, en 1958, à Lille sur MB
Thermodynamique et matériaux (THERMA), UMS 818	Bernard [Bertrand Cheynet (ingénieur)]	[1992] [2000]	Grenoble, Saint-Martin d'Hères (38) (Alpes)		Probable lien avec le laboratoire précédent (Fruchart ?)
Matériaux et génie physique (LMGP), UMR 5628	Roland Madar (DR)	[2000]	Grenoble, Saint-Martin d'Hères, INP		? + section 8
Fluorures, URA 449 [ESA 6010]	Jacoboni [Marc Leblanc (prof)]	[1992] [2000]	Le Mans, université du Maine (Bretagne)	MF	De Pape (Hagenmuller)
Chimie minérale [Chimie minérale et métallurgie] (Chimie minérale appliquée) [Chimie minérale appliquée et métallurgie]	André Michel (1945-1960) (G. Tridot) [(12/40%), directeur Ecole en 1973]	1945 [1949] [1956] (1963) [1966]	Lille, ICL → ENSC de Lille (1948 ?)	MO, MS, MC, MB, MN, magnétisme, Fe, Ni, Co (B ₂ S ₃) [M transition...]	Chaudronnerie [ancien élève de Chrétien, thèse en 1949]
Structure et propriétés de l'état solide (LSPES) [URA 234] [ESA 8008]	Bernard Escaig [Farvacque] [Jean-Marc Lefebvre]	[1975] [1992] [2000]	Lille, Villeneuve d'Ascq [Lille 1 (Nord)]		[physique + sections : 15, 13, 6, 19 (mentionnée en 4 ^e)]
Cristallochimie et physicochimie du solide (LCPS), URA 452 [ESA 8012]	Boivin [Francis Abraham (prof)]	[1992] [2000]	Lille 1 (Nord), [Villeneuve d'Ascq]		
Chimie minérale [Céramiques nouvelles de type nitrure] [Céramiques nouvelles, URA 320] [Science des procédés céramiques et traitements de surface (SPCTS), UMR 6638]	Michel Billy (3) [Billy et Pierre Fauchais] [Bernard Frit] [Jean-François Baumard (prof)]	> 1964 [1966] [1975] [1992] [2000]	Limoges, CSU [Centre Auvergne et Limousin]	Si, groupes IV et V [Nitrures]	Billy est au LCM de Poitiers (G. Valesi) en 1956 + a 1 publication avec Trombe [Frit est un Bordelais] [sections 9, 10]
Chimie industrielle et minérale [Chimie minérale] [Chimie minérale et analytique]	René Pâris [21/33%]	<1944 [1949] [1956-1964] [1966]	Lyon, FcS	Chimie minérale en solution [phosphore, diagrammes de solubilité] [MO, MS, MC]	?
Chimie minérale [Physico-chimie minérale, 1968] [URA 116]	Jean Cueilleron (5) [Jean Bouix (prof)]	[1956] (1968) [1992]	Lyon, Institut de Chimie [Lyon 1, Villeurbanne (Vallée du Rhône)]	HT, B, Ti, W, métaux réfractaires	Vient de Mulhouse (Hackspill) [Bouix devient dir. de Multimatériaux et interfaces [2000]]
Chimie minérale	Jean Bousquet (7/80%)	< 1962 [1966]	Lyon, INSA	Thermodynamique des MO	?

Chimie minérale [Physico-chimie minérale II]	Roger Cohen-Adad (10)	< 1960 [1966] [1971]	Lyon, FdS	Diagrammes de phase (alcalins et halogènes) [MOH-MX avec M alcalin, X halogène]	Prof à Alger en [1961] diagrammes de phases
Génie chimique	Charles Eyraud (18/20% ?)	< 1960 [1966]	Lyon, FdS	Piles à combustibles...	Collaboration avec Prettre en 1956.
Chimie industrielle	Marcel Prettre	[1966]	Lyon, FdS	Chimie de l'état solide (Y. Trambouze)	?
Physique des matériaux (Département) [Multimatériaux et interfaces, UMR 5615]	Robert Uzan [Jean Bouix (prof)]	[1975] [2000]	Lyon [Lyon 1, Villeurbanne (Vallée du Rhône)]		? (P)
Physico-chimie des solides luminescents (ER 1968) [Physico-chimie des matériaux luminescents (LPCML), URA 412] [UMR 5620]	Françoise Gaume [Boulon] [Christian Pedrini (DR)]	(1968) [1975] [1992] [2000]	Lyon, Villeurbanne [Lyon 1, Villeurbanne (Vallée du Rhône)]		Trombe (Gaume est déjà à Lyon, Institut de Physique générale, en 1963)
Energétique et synthèse inorganique, ERS 2008	Jean-Jacques Counieux (prof)	[2000]	Lyon 1		+ section 41
Chimie minérale B	Jean Cabané (1)	1964 [1966]	Marseille, FdS	Métallurgie : diffusion, S	Bénard
Chimie générale B	Marc Laffitte (8/35%)	< 1961 [1966]	Marseille, FdS	Chimie des solides : non stœchiométrie et thermodynamique	1 publi avec O. Kubaschewski
Physico-chimie des matériaux	André Casalot	1975	Marseille, FdS	Oxydes de transition	Hagenmuller
Etudes des interfaces et interactions entre défauts dans les solides (EDIFIS), URA 443 [UMR 6518]	Mme Cabané [Ahmed Charai (DR)]	[1992] [2000]	Marseille (Aix-Marseille 3)		Lien avec Jean Cabané ?
Etude des textures et application aux matériaux (LETAM), UMR 7078	Francis Wagner (prof)	[2000]	Metz, LETAM- ISGMP (N-E)		+ section 9
Utilisation de l'énergie solaire ^{LP}	Félix Trombe (1950->64) [8]	1950- [1966] [1975]	Montlouis [Odeillo]	Synthèse HT	Trombe, chimie des HT [passe dans la section énergétique]
Ultra-réfractaires ^{LP}	Marc Foex (4)	1963 [1966] [1975]	Montlouis [Odeillo]	HT	Weiss – Trombe Coll. Jean-Pierre Coutures
Institut de science et de génie des matériaux et procédés (IMP), UPR 8521	Dupuy [Bernard Spinner]	1995 [2000]	Perpignan, Rambla de la Thermodynamique, Tecnosud / Font-Romeu		département « science des matériaux » (n'est plus mentionné en chimie [1992]),

					sections 10, 19
Chimie minérale A	Antoine Potier (9/25%) dans Centre d'électronique du solide	< 1961 [1966]	Montpellier, FdS	Semi-conducteurs III-V	?
Chimie minérale B	Gilbert Tourné (prof. en 1973) (4)	< 1964 [1966]	Montpellier, FdS	MO, MS de transition	Ancien élève de Chrétien. (1 publi avec Souchay)
Chimie minérale C [Chimie des matériaux isolants ferro-électriques]	Maurice Maurin (8/50%)	< 1961 [1966] [1975]	Montpellier, FdS	thiocarbonates	Thèse à Montpellier en 1962
Sciences des Matériaux [Des Verres (1972 ?) puis (1984) Matériaux vitreux]	J. Zarzycki (1970-84) [?]	1970	Montpellier		Thèse avec E. Darmois (Sorbonne) (P) [section physique]
Physico-chimie des matériaux solides, URA 407 [Physico-chimie de la matière condensée (LPMC), UMR 5617]	Michel Ribes (prof)	[1992] [2000]	Montpellier 2 (Languedoc Roussillon)		Successeur de Maurin
Physico-chimie des matériaux, URA1312 [Matériaux et procédés membranaires (LMPM), UMR 5635]	Louis Cot (prof)	[1992] [2000]	Montpellier, ENSC		Elève de Maurin. + sections 18, 10
Agrégats Moléculaires et Matériaux Inorganiques (LAMMI), URA 78	Jacques Rozière (prof)	[1992]	Montpellier 2 université		Section 18 (et pas 19)
Chimie	Jean Cueilleron	1946	Mulhouse, Ecole de chimie	B, Al (combustion dans l'oxygène)	Hackspill
Chimie minérale appliquée	A. Hatterer	1964	Mulhouse, ESC	?	?
Centre de recherches physico-chimie des surfaces solides ^{LP}	J.B. Donnet	(1968)	Mulhouse	Texture et structure des surfaces	
Matériaux minéraux (LMM), URA 428 [ESA 7016]	Guth [Joël Patarin (DR)]	[1992] [2000]	Mulhouse, Alsace		Section 18
Institut de chimie des surfaces et interfaces (ICSI), UPR 9069	Jacques Schultz (prof)		Mulhouse, Alsace		Section 18, 15
Physique et physico-chimie du métal - Radiocristallographie [Métallurgie]	P. Olmer [René Faivre (12)] [9]	[1956] [1961] [1966]	Nancy, ENSMIM		[Chaudron]
Chimie minérale industrielle	Henri Guérin (12) part à Orsay en 1961 [Albert Hérold (2), (4)]	[1956] < 1960 [1961] [1966]	Nancy, FdS	sels (arséniates, arsénites, phosphates) [C, insertion, M-H]	[GFEC] Hérold vient du L de l'ENSC de Mulhouse [1961]
Chimie minérale	M. Letort (15)	[1956]	Nancy, FdS,	cinétique	?

	[Jacques Aubry (8), (9/80%)]	[1961] [1966]	[ENSIC] [Nancy 1 (NE)]	chimique uniquement [MO (fer)]	
Métallurgie et chimie du solide [Chimie du solide] [Chimie du solide minéral, URA 158] [UMR 7555]	Aubry, Faivre, Herold [Aubry] [Guérard] [Pierre Steinmetz (prof)]	1966 [1975] [1992] [2000]	Nancy [Vandoeuvre les Nancy]		Aubry, Faivre, Herold
Chimie minérale [A] [Structures bidimensionnelles et rôle stéréochimique des doublets solitaires, 1974] [Institut des matériaux de Nantes (IMN), 1988, UMR 110] [UMR 6502]	Jean Rouxel [avec Tournoux] [Jean Rouxel] [Serge Lefrant (prof)]	1963 [1966] [1975] [1992] [2000]	Nantes, FdS [Nantes (Bretagne et Pays de Loire)]	M ₃ , (1D et 2D), chimie douce	Hagenmuller [+ physique Orsay + sections 5, 10, 18]
Chimie minérale B	Michel Tournoux	1966-1974		MO	Hagenmuller
Chimie générale II	Jean Bardolle (6)	< 1961 [1966]	Orléans, CSU	Corrosion, surface	Bénard
Chimie minérale	G. Vuillard (2)	[1966]	Orléans, CSU	Diagrammes de phase + ½ cond	?
Centre de recherches sur la chimie de combustion et des hautes températures ^{LP}	Paul Laffitte	1969	Orléans	HT	
Centre de recherches sur la physique des hautes températures (CRPHT) [UPR 4212] [Centre de recherches sur les matériaux à haute température (CRMHT), UPR 4212]	F. Cabannes et Anne-Marie Anthony (30) puis [Anthony] [Jean-Pierre Coutures] [Guy Matzen]	1969 [1975] [1992] [2000]	Orléans [Orléans (Centre Auvergne et Limousin)]	MO, HT	Transfert du « Laboratoire des échanges thermiques » (Ribaud, ex-dir.) (Bellevue) Décentralisation [section 19]
Centre d'études et de recherches par irradiation (CERI), UPR 33	Gilbert Blondiaux (DR)	[2000]	Orléans (délégation Centre Auvergne et Limousin)		? plutôt défauts des matériaux
Chimie minérale [Etude des systèmes oxydo-réducteurs dans l'état solide]	André Michel (14) [Paul Poix]	[1966] < 1960 [1975]	Orsay, FdS	Semi-métalliques, Ox spinelles, Cr	Fruchart et Bernier [thèse avec Michel, 1964, Paris]
Chimie minérale	H. Guérin	[1961]	Orsay, FdS	combustibles, arsénates, phosphates. Réactions à l'état solide	Guérin vient de Nancy
Interactions atomiques et défauts dans les métaux	Pierre Lucasson	[1975]	Orsay		Thèse 1958 publiée dans annales de physique

Service de diffusion de la technologie des matériaux	Jean-Pierre Chapelle	[1975]	Orsay	Laboratoire de services	Coll. Pouchard à Bordeaux
Thermodynamique et physico-chimie des solides, URA 446 [Physico-chimie des solides, UMR 8648]	Alexandre Revcolevschi (prof)	1979 [1992] [2000]	Orsay, Paris 11		Collongues
Chimie minérale [Chimie du solide, ERA en 1966] [Chimie minérale et structurale, n°200, 1972, associé avec le laboratoire de physique de Pierre Laruelle] [URA 200]	Marius Picon (3 en 1949) [Jean Flahaut (1966-1984), 50 en 1976] [D. Carré, (42 en 1988)] [J. Dugué]	1946 [1949] 1966 [1973-92] [1992] fin LA en 1992.	Paris 5, Faculté de Pharmacie	MS	Moissan, Lebeau, chimie des HT
Centre de recherches métallurgiques [Centre de recherche de métallurgie physique]	Paul Lacombe (prof) (8) [22]	[1956] [1966]	Paris, Ecole des Mines	métallurgie et physique du métal	Ancien élève de Chaudron. Succède à Crussard Coll. Jacques Friedel
Chimie minérale	André Boullé (13)	< 1963 [1966]	Paris, Ecole des Mines	Sels de phosphore, métaux, C	Jolibois
Recherches métallurgiques et chimiques [Physico-chimie des métaux et des matériaux]	Lacombe (associé à Boullé)	1968 [1975]	Paris, Ecole des Mines		Chaudron et Jolibois
Chimie minérale	André Chrétien (1943-1973) (17/30%)	1943 [1966]	Paris, FdS	MO, MS, MF, MB « chimie dans l'état solide » et dans solvants non aqueux (1963-64)	Le Chatelier, Cornec
Chimie des solides	Jean Amiel (1905-1986) (11/20%)	< 1960 [1966]	Paris, FdS	Surfaces, catalyseurs, magnétochimie, transition (Co, C)	Fait sa thèse à Toulouse sur le benzène. Dirige thèse de Figlarz. Chimie surface.
Chimie minérale des sels	A.-P. Rollet (10/50%)	< 1959 [1966]	Paris, FdS	Borates, carbonates	L → Cohen-Adad
Chimie minérale I	Henry Brusset (19/15%)	< 1960 [1966]	Paris, FdS	C, chimie des surfaces	ENS Thèse avec Pascal
Hautes températures	Marc Foëx	1945-50	Paris, ICP	HT	Trombe
Chimie minérale	Brasseur P.	1946	Paris, ICP	HT, RX, magnétique, spectroscopie Fe ₂ O ₃ et de P ₂ O ₅	?
Chimie minérale [Chimie appliquée] [Physico-chimie des surfaces] [Structure et propriétés superficielles des métaux, ESA 7045]	Jacques Bénard (26) [Jacques Oudar] [Philippe Marcus]	1951 [1966] (1974) [2000]	Paris, ENSCP	MO, surfaces. [métallurgie]	Chaudron [section 18]
Métallurgie	Michel Fayard	(1974)	Paris, ENSCP	M	Bénard

Corrosion des métaux [Génie chimique et corrosion]	Jean Talbot (5)	< 1966 [1966] (1974)	Paris, ENSCP	Corrosion des M et alliages	Chaudron
Recherches métallurgiques	Georges Chaudron (3)	< 1962 [1966]	Paris, ENSCP	M	Coll. H. Mondange
Haute température et désordres structuraux, ERA 387 en 1974 (Chimie appliquée de l'état solide)	Robert Collongues (1972-1988) [Daniel Vivien (prof)]	1972 [1975] (1988-2000)	Paris, ENSCP		Chaudron
Cristallochimie des composés oxygénés et fluorés des éléments de transition (ER 1968) [Cristallochimie du solide, URA 1388]	William Freundlich [Michel Quarton]	(1968) [1975] [1992]	Paris	Ti à HT (thèse) puis Thallium (dans Pascal, 1978)	Chrétien (thèse à Paris en 1952) [stagiaire de recherche en 1973 chez Chrétien]
Etude, par diffraction très précise des rayons X, des transitions thermodynamiques du deuxième ordre	Dominique Weigel (1929)	[1975]	Paris Nord	<i>Cristallographie et structure des solides</i> , 1972	? Thèse Paris, 1960 (lien avec Prettre)
Spectrochimie du solide [Matériaux inorganiques, URA 1466] [UMR 7574]	Jacques Livage (prof)	1978 [1992] [2000]	Paris 6 (Paris B)		Collongues et Mazières + section 5
Chimie	Jean Deschamps (13/15%)	< 1960 [1966]	Pau, CSU	Thermodynamique des réactions	Simon Gromb
Chimie minérale	G. Valesi	1948 [1956]	Poitiers, FdS	« chimie physique minérale » : thermodynamique, cinétique, électrolyse	? [1961] Billy est parti
Chimie minérale (A)	Raymond Rohmer (14, 33%) puis prof à Strasbourg [Hagenmuller (1957-60)]	[1956] < 1957	Rennes, FdS	HT, RX, semi-conducteurs, étude des solides, bromures d'uranium	Rohmer (MdC en 1949) Prigent assistant (1956)
Chimie minérale B (Chimie d'éléments de transition, ERA 1968) [Chimie et cristallochimie d'éléments de transition] [Verres et céramiques (LVC), URA 1496] [UMR 6512]	Jacques Prigent [7] [Jacques Lucas (prof)]	> 1957 [1966] (1968) [1975] [1992] [2000]	Rennes [Rennes 1 (Bretagne)]	Composés U, W [verres de fluorures]	? (P) [section 19 uniquement] En 1964, Sergent et Caillet sont dans ce laboratoire.
Chimie minérale C	Jean Lang [7] (prof.)	1963 [1966] (1973)	Rennes, FdS	Nitrures de Si et Ca	Ancien élève de Chrétien. Roger Marchand est son élève.

Chimie générale B	Dominique Weigel (3) [parti à Paris]	< 1962 – [1966]	Rennes, FdS	N, M de transition	Lien avec Prettre
Chimie du solide et inorganique moléculaire (CSIM), URA 1495 [UMR 6511]	Guérin [Jean-François Halet (DR)]	[1992] [2000]	Rennes 1 (Bretagne)		[+ sections 18]
Céramique	P. de Groot (6)	[1956]	Sèvres, Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle	« industries de la céramique et des silicates »	
Institut de Chimie [Chimie générale]	Hubert Forestier [30 / 25%] [11]	< 1949 [1949] [1956] [1961] [1966]	Strasbourg, Institut de Chimie	MO (Fe, TR, ...), magnétisme, réactivité [physico-chimie du solide]	Chaudron
Chimie structurale	Raymond Weiss (6/66%)	< 1962 [1966]	Strasbourg, Institut de Chimie	M de transition + solides organiques	? a pour élève Foex ?
Chimie minérale (Chimie minérale structurale) [Chimie minérale et structurale, ERA 1967]	Raymond Rohmer (9/50%) (prof en 1973)	1956-57 [1961] (1963) [1966] 1967	Strasbourg, FdS	Cristallochimie des M de transition, U	Ancien élève de Chrétien, vient de Rennes
Chimie générale et minérale, 1/2 « chimie des solides » puis scission en 1968 [Chimie des solides et des hautes températures, 1968]	Fernand Gallais (29/50%) [Gérard Montel]	< 1941 (1949) [1956] [1966] (1968)	Toulouse, FdS	M, M-(TR, Ge, Sn, P)	[Chaudron] + Jeannin (Bénard) Montel est déjà au labo en 1964 (apatite).
[Chimie des matériaux inorganiques, URA 1311] [Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux (CIRIMAT), UMR 5085]	Abel Rousset (prof)	1978 [1992] [2000]	Toulouse 3 université (Midi Pyrénées)		Pâris [+ sections 15, 8, 9, 18, 22] [caractéristique de l'évolution des centres de recherche interdisciplinaires]
Optique Electronique ^{LP} (LOE) [Centre d'élaboration des matériaux et d'études structurales ^{LP} (CEMES)]	Gaston Dupouy (1957-) [Jean Galy (1989-96)]	1957 (1989)	Toulouse 3		Dupouy (physique) [Hagenmuller et Gallais]
Cristallochimie, réactivité et protection des matériaux, URA 445	Dabosi	[1992]	Toulouse		?
Electrodynamique des matériaux avancés, FRE 2077	François Gervais (prof)	[2000]	Tours (Centre...)		?
Institut de réactivité,	Gérard Férey	[2000]	Versailles,		

électrochimie et microporosité (IREM), UMR 8637	(prof)		université (IdF N et O)		[+ section 18]
Central des traitements chimiques ^{LP} (LCTC) [Centre d'études de chimie métallurgique ^{LP} (CECM), oct. 1952] [UPR 2801]	Georges Chaudron (1939-1962) [André Michel (1962-1978)] Michel Fayard (1978-84) Georges Martin (1984-88) [Jean-Pierre Chevalier (1988-2000)]	1937– [1949] 1952 [1966] [1975] [1992] [2000]	Vitry-sur-Seine	M et MO	Chaudron

A.III.2. Répartition des degrés d'oxydation pour les éléments de transition (1920-1955)*

Degrés d'oxydation	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
7					o					
6				o	o	o				
5			o	X	X	X				
4		o	o	X	o	X	X	X		
3	o	o	o	o	o	o	o	X	X	
2	?	o	o	o	o	o	o	o	o	o
1	?	?	?	X	X	X	X	X	o	
0			X	X	X	X	X	X		

* Les « o » représentent les degrés d'oxydation pour lesquels on a trouvé des représentants avant 1920. Les « X » représentent les stades d'oxydation pour lesquels on a trouvé des représentants dans les dernières décennies (1920-1955). Les « ? » représentent les cas douteux.

A.III.1. Reconstitution (approximative) de la succession des présidents de la section chimie minérale (puis chimie du solide) du Comité national CNRS.*

- 1951 : Georges Chaudron
(chimie minérale).
- 1959 : Louis Hackspill.
- 1961-64 : Chaudron
(section 12, chimie minérale).
- 1967-70 : Étienne Bonnier
(section 14, chimie minérale).
- 1971-1975 : André Michel
(section 15, chimie minérale).
- 1976-1979 : Paul Hagenmuller
(section 11, chimie des matériaux solides)
- 1980-1982 : Michel Fayard.
- 1983-1987 : Hagenmuller
(section 14, chimie et physico-chimie des matériaux inorganiques).
- 1987-1990 : Jean Rouxel
(section 14, physico-chimie des matériaux).
- 1991-95 : Annick Percheron
(section 19, élaboration, caractérisation et modélisation du solide).
- 1995-99 : Bernard Raveau.

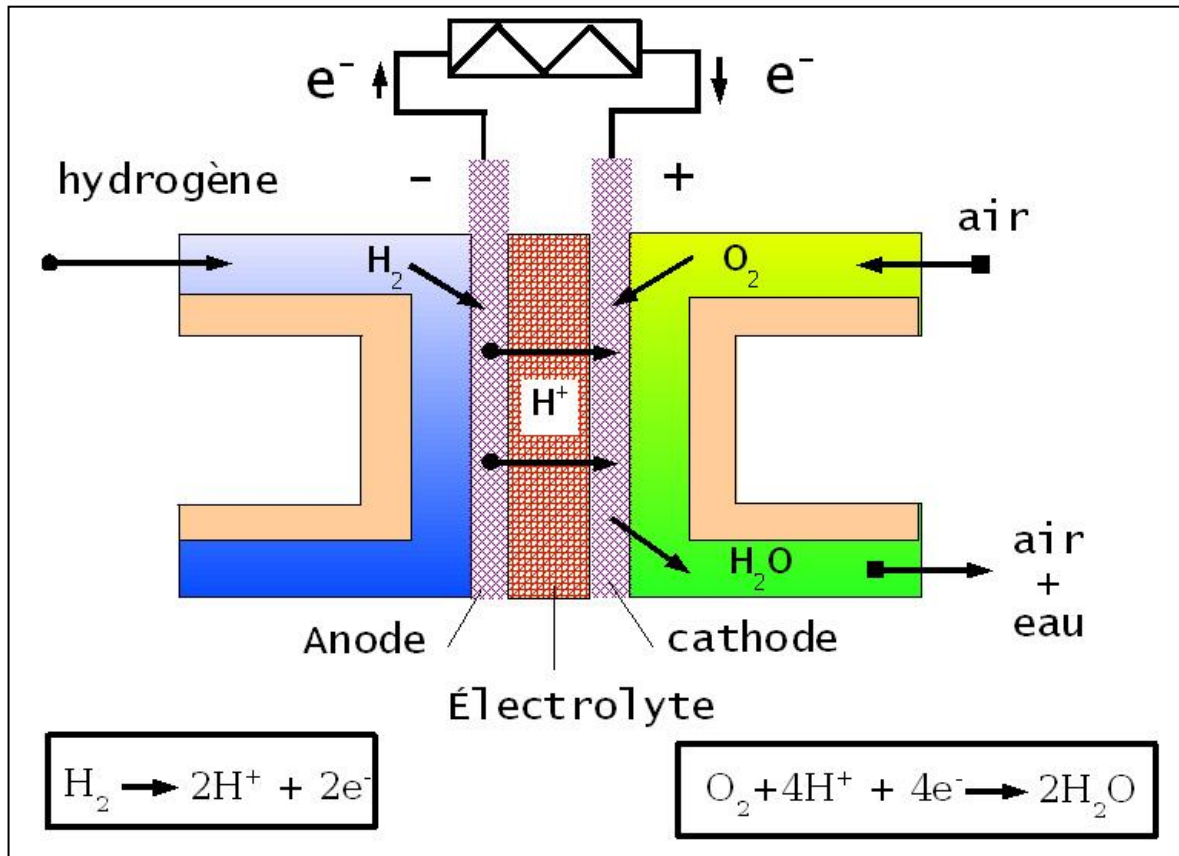
* Président avec dates approximatives, puis numéro de section et énoncé de la section. Seuls les changements sont indiqués pour ces deux dernières données.

A.IV.1. Le four à plasma : photographie (LCAES)*



* Avec le concours d'Andrée Kahn-Harari (LCAES).

A.IV.2. Schéma de principe d'une pile à combustibles hydrogène/oxygène*



* Ce document provient de l'encyclopédie numérique « Wikipédia » disponible sur Internet.

A.V.1. Communications originales de la Commission de chimie des hautes températures et des réfractaires du CNRS lors des séances internes (1956-1963)

date réunion	Auteurs	énoncé de la communication
13-12-56	G. Chaudron	Travaux sur l'état amorphe.
	G. Montel	Recherches sur l'état amorphe.
	S. Tacvorian	Nouvelles méthodes de mesures de la résistance aux chocs thermiques.
	H. Guérin	Recherches sur les arséniates et les phosphates.
14-3-57	Mme Lapoujade	Généralités sur la résistance aux chocs thermiques des matériaux réfractaires.
	E. Bonnier	Un four de laboratoire à vide contrôlé.
	R. Collongues	Préparation de composés réfractaires à base de zirconium à partir de l'état amorphe.
	F. Trombe, M. Foëx	Le traitement au four solaire des substances réfractaires placées sur plaques métalliques réfrigérées.
	J. Cueilleron	Étude du diagramme de fusion tungstène silicium.
6-3-58	P. Hubert	Recherches sur la fusion contrôlée.
	M. Bouchet	Les fours électriques dans l'élaboration et le traitement de la silice et de ses composés.
20-11-58	J. Parisot, Perrin	Mesure de la brillance d'un cratère de charbon d'arc.
	J. Cueilleron	Thermobalance de torsion et quelques applications.
	L. Hackspill, Mme Platzer	Sur la préparation du calcium par dissociation de son carbure.
	H. Stöcker	La stabilisation de la zirconium quadratique.
	J. Lefèvre, R. Collongues	Sur le système zirconium-oxyde de germanium.
	M. Perez y Jorba, R. Collongues	Sur la nature des phases cubiques du système zirconium-oxyde de germanium.
	J. Flahaut, Mme Patrie	Les systèmes sulfure d'aluminium-sulfure de terres rares. Conditions de formation d'un verre de sulfure.
G. Montel	Évolution des précipités amorphes d'oxyde ferrique hydraté, dans les différents milieux.	
30-4-59	Hubert	État actuel des recherches sur les plasmas à haute température.
	Elston (CEA)	Influence des traitements thermiques sur les frittés d'oxyde de béryllium irradiés aux neutrons.
	E. Bonnier	Sur l'obtention du manganèse par distillation d'alliages industriels.
	Lefèvre, Perez y Jorba, Collongues	Sur les diagrammes d'équilibre zirconium-oxyde de terres rares.
	Flahaut, Bénacerraf, Mlle Guittard	Sur le comportement thermique des sélénures de terres rares.

	G. Montel	Les précipités amorphes d'oxyde de fer et les conditions de leur stabilisation.
14-6-60	Collongues, Lefèvre	Remarques sur les diagrammes d'équilibre zircone-oxydes de terres rares.
	Collongues, A.M. Lejus	Sur la formation d'une phase intermédiaire au cours de la décomposition d'un spinelle non stœchiométrique.
	Khodadad	Composés de l'uranium avec le sélénium.
	M. Foëx	Quelques propriétés des solutions solides et des composés à base d'oxyde de lanthane.
	J.C. Achard	Conditions de préparation du protoxyde d'euporium.
	S. Teichner	Préparations des oxydes homodispersés dans le chalumeau oxyhydrique (film).
	F. Trombe	Les nouveaux fours de recherches du Laboratoire de Mont-Louis.
30-11-60	F. Cabannes	Etude de la combustion du méthane en présence de platine.
	R. Collongues, J. Lefèvre, H. Mondange, M. Perez y Jorba.	Composés nouveaux formés par la zircone et la thorine, avec les oxydes des métaux tétravalents (ZrO_2-GeO_2 et ThO_2-TiO_2).
	J. Flahaut, L. Domange, M. Patrie	Le diagramme de phases du système sulfure d'yttrium-sulfure de calcium.
10-5-61	S. Teichner, M. Faron	Mesures du coefficient d'accommodation thermique du néon sur des filaments de tungstène et d'alliages or-palladium purifiés par chauffage à incandescence sous vide très poussé.
	P. Poyet, E. Bonnier	Préparation du calcium de haute pureté.
	P. Levêque	Variation des impuretés dans le graphite artificiel en fonction de la température.
	F. Trombel, J. Parisot	Les graphites de pyrolyse.
	R. Collongues	Un nouveau modèle de chalumeau à plasma.
	A. Lecerf	Trois nouveaux composés ternaires oxygénés du titane trivalent.
23-5-62	E. Bonnier, P. Desré	Nouvelle représentation des affinités chimiques.
	J. Bénard, Y. Jeannin	Non stœchiométrie dans le système titane-soufre.
	R. Collongues, J.C. Gilles, A.M. Lejus	Action de l'ammoniac sur les oxydes réfractaires.
	J. Flahaut, L. Domange, M. Patrie	Etude cristallographique des systèmes de sulfures réfractaires.
	P. Albert	Purification du zirconium par fusion à l'aide de bombardement électronique.
12-6-63	J. Philips	Mesure des températures dans les plasmas.
	R. Collongues, F. Galtier, J. Reboux	Récents développements apportés aux fours à plasma haute fréquence.
	A.-M. Anthony	La conductibilité électrique des mélanges frittés de zircone-oxyde de lanthane entre 1000 et 1700°C.
	M. Perez y Jorba, R. Collongues, J. Reboux	Chauffage direct des oxydes réfractaires par induction haute fréquence.
	J. Cotteret, M.J. Barbier (J. Besson)	Décharge cathodique du zirconium au cours de l'électrolyse du fluorozirconate de potassium.

1963	F. Trombe	Le four solaire de 1000kW d'Odeillo-Font-Romeu.
	F. Cabannes	Observation des écoulements laminaire et turbulent dans un jet de chalumeau à plasma.
	Juillet (Teichner)	Dosages de l'alumine alpha par spectrométrie X.
	J. Trouvé	Méthode d'obtention de petits échantillons en alliages uranium-carbone par fusion par induction en auto-creuset et coulée.
	F. Leprince-Ringuet, R. Collongues	Sur la réaction du carbone avec les oxydes réfractaires à haute température.

Annexe A.V.2.
Ensoleillement d'Odeillo pour l'année civile 1969.*

- TABLEAU IV -

ENSOLEILLEMENT D'ODEILLO DU 1^{er} JANVIER 1969 au 31 DECEMBRE 1969

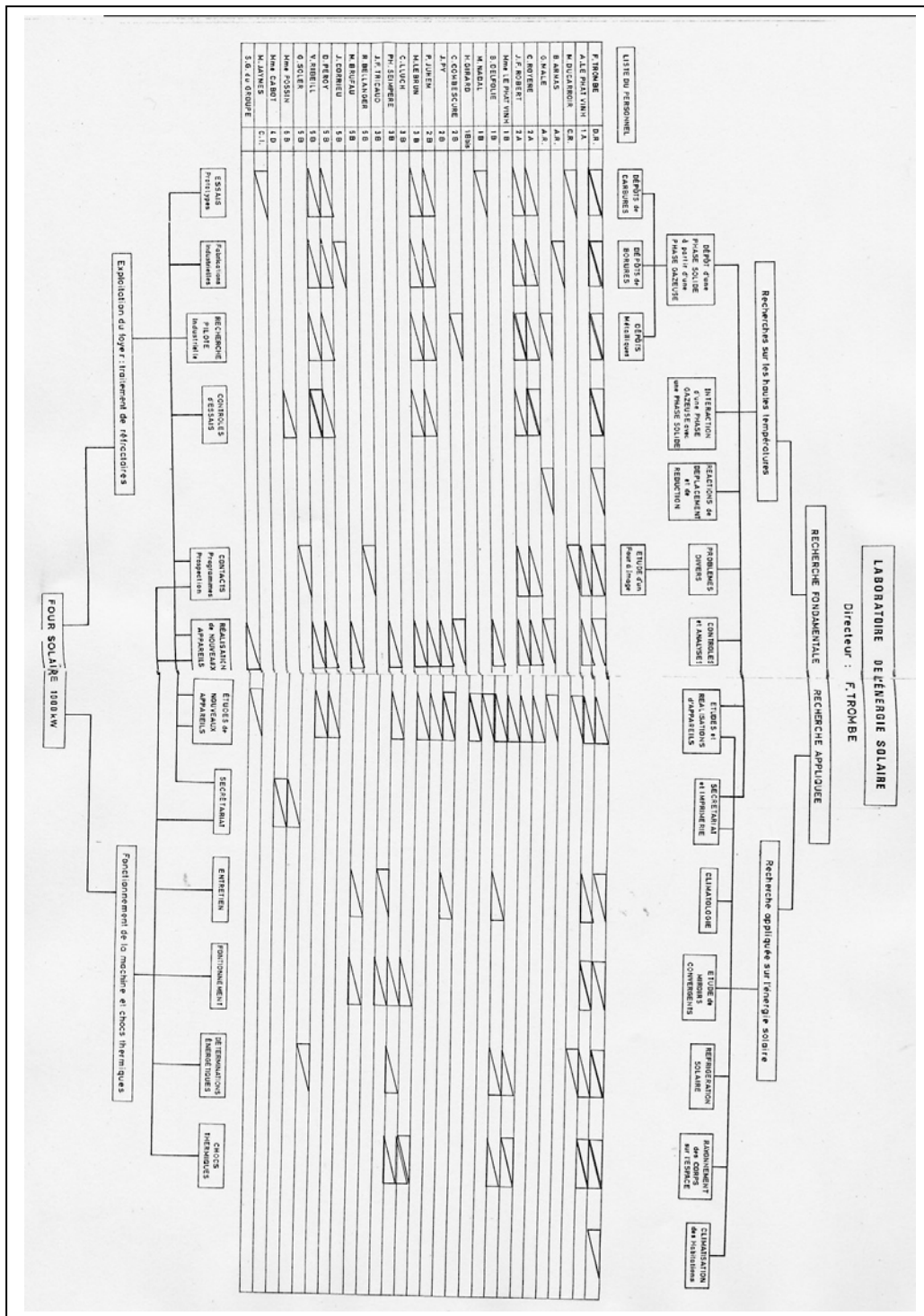
Légende - Signes conventionnels -

- - Ciel très clair
- ⊙ - Ciel légèrement voilé, mais utilisable.
- ⊖ - Ciel clair, avec quelques passages nuageux.
- ⊕ - Ciel clair, avec passages fréquents de nuages.
- + - Ciel couvert, mais lumineux.
- * - Ciel sombre - // - Pluie - Δ - Neige.

1969		○	⊙	⊖	⊕	+	*	//	Δ
Janvier	Matin	9	2	1	1	2	14	0	0
	Soir	7	4	0	2	2	10	1	3
Février	Matin	6	1	6	2	7	6	0	0
	Soir	6	0	4	2	6	4	1	5
Mars	Matin	4	2	4	4	12	4	0	1
	Soir	4	3	0	5	12	6	0	1
Avril	Matin	3	4	5	4	5	8	1	0
	Soir	1	0	4	7	7	8	2	1
Mai	Matin	4	0	6	8	4	5	0	0
	Soir	2	4	4	5	6	5	1	0
Juin	Matin	6	2	4	1	13	4	0	0
	Soir	0	4	2	0	18	5	1	0
Juillet	Matin	9	7	6	1	6	1	1	0
	Soir	2	3	4	5	14	1	2	0
Août	Matin	11	3	5	1	8	2	1	0
	Soir	1	3	2	4	14	7	0	0
Septembre	Matin	10	6	2	2	6	2	2	0
	Soir	5	2	3	2	9	5	2	0
Octobre	Matin	13	3	1	4	5	4	1	0
	Soir	10	5	2	3	6	1	4	0
Novembre	Matin	10	1	0	3	10	4	1	1
	Soir	9	2	5	1	7	4	1	1
Décembre	Matin	3	2	2	4	14	4	0	2
	Soir	6	1	2	4	7	6	2	3
Total annuel en 1/2 journées		141	64	74	75	200	120	24	18

* Le diagramme est extrait du rapport d'activité du LES [RA LES, 1970].

A.V.3. Organigramme du Laboratoire de l'énergie solaire vers 1970.*



* Le diagramme est extrait du rapport d'activité du LES [RA LES, 1970].

A.VI.1. Liste chronologique des thèses françaises contenant « chimie douce » dans leur titre*

Références des disciplines des thèses : chimie (5), physique (3), chimie-physique (1), physique-chimie (1), science des matériaux (3,5), sciences (1), sciences appliquées (2), chimie du solide (0,5), sciences et techniques (1). [1984-2000]

Marie-France RENO. *Réactions de modification sur LiNbO₃, NbO₂F et TiOF₂ : chimie douce et topotaxie*. Th. : sciences des matériaux : Le Mans (université du Maine) : 1984, 109 p.

Martine DOEUFF (sous la dir. R. Clément). *Matériaux lamellaires MPS₃ (M = Mn, Cd, Fe, Ni) et chimie de coordination : caractérisation structurale et propriétés de nouveaux composés obtenus par chimie douce*. Th. : chimie : Paris 11 : 1988, 183 p.

PROUZET Eric (sous la dir. de Raymond Brec). *Ordre local dans de nouvelles formes de NIPS₃ obtenues par chimie douce et par intercalation de lithium*. Th. : physique : Nantes : 1988, 130 p.

BORTHOMIEU Yannick (sous la dir. de Claude Delmas). *Contribution de la chimie douce à l'étude des hydroxydes et oxyhydroxydes de nickel substitués au cobalt*. Th. : science des matériaux : Bordeaux 1 : 1990, 230 p.

BENCHRIFA Rachid (dir. R. de Pape). *Synthèse hydrothermale et caractérisation de composés à valence mixte du vanadium, du molybdène et du tungstène associés à l'ion ammonium. Leur modification par la chimie douce*. Th. : physique : Le Mans : 1990, 145 p.

FRAGNAUD Pascal. *Nouveaux thiophosphates de métaux de transition obtenus par chimie douce et chimie dure*. Th. : sciences : Nantes : 1992, 210 p.

BENBERTAL Djamel (dir. Alain Mosset). *Sur de nouvelles méthodes de synthèses de poudres céramiques : élaboration et caractérisation de silicates préparés par chimie douce*. Th. : science des matériaux : Toulouse 3 : 1993, 119 p.

GARCIA Béatrice (dir. R. Messina). *Caractérisation structurale d'oxydes de cobalt et de nickel synthétisés par chimie douce et étude de leur comportement électrochimique comme matériaux cathodiques de batteries au lithium*. Th. : sciences appliquées : Paris 6 : 1994, 213 p.

SEGUIN Laurent (dir. Michel Figlarz). *Préparation, détermination structurale et propriétés de nouveaux oxydes de métaux de transition obtenus par chimie douce*. Th. : chimie : Amiens : 1994, 164 p.

* Cette liste a été établie grâce au moteur de recherche SUDOC au printemps 2007.

MELGHIT Khaled (dir. M. Touboul). *Synthèse par chimie douce, caractérisation et propriétés de vanadates d'indium et de chrome*. Th. : chimie : Amiens : 1994, 157 p.

LE GOFF Philippe (dir. Noël Baffier). *Étude et caractérisation d'oxydes lamellaires de type A_xMnO_2 , $n H_2O$ synthétisés par chimie douce. Comportement structural et propriétés électrochimiques vis-à-vis de l'insertion du lithium*. Th. : chimie : Paris 6 : 1994, 264 p.

PETIT Stéphane (dir. JP Doumerc). *Une nouvelle méthode de chimie douce : destruction des ions ammoniums par le dioxyde d'azote*. Th. : chimie du solide – science des matériaux : Bordeaux 1 : 1996, 200 p.

FAVOTTO Claude (dir. Marc Roubin). *Élaboration par chimie douce et caractérisation de céramiques piézoélectriques à base de plomb, de hafnium et de titane (PHT)*. Th. : sciences appliquées : Toulon : 1997, 163 p.

BELIN Stéphanie (dir. Roger Chevrel). *Chimie douce et auto-intercalation du molybdène dans les phases de Chevrel pseudo-binaires $Mo_6Se_{8-x}S_x$. Corrélations : structures, synthèses et propriétés*. Th. : chimie-physique : Rennes 1 : 1997, 250 p.

GUIGUE-MILLOT Nadine (dir. Pascal Perriat). *Synthèse et propriétés de ferrites nanométriques : influence de la taille des grains et de la nature de la surface sur les propriétés structurales et magnétiques de ferrites de titane synthétisés par chimie douce et mécanosynthèse*. Th. : physique-chimie : Dijon : 1998, 124 p.

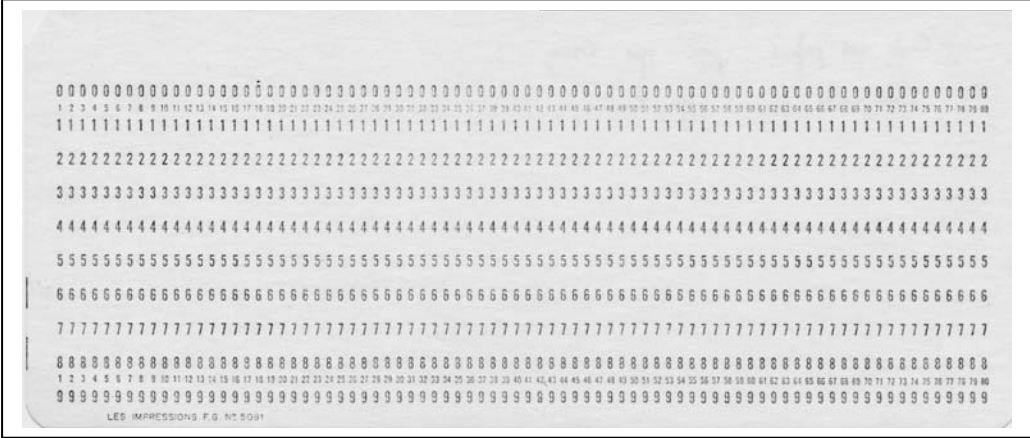
PERROT SIPPLE Frédérique (dir. Daniel Aymes). *Maîtrise de la taille de nanograins de structure perovskite pour applications électrocéramiques : synthèse par chimie et broyage par attrition*. Th. : sciences et techniques : Dijon : 1999, 117 p.

BAUDRIN Emmanuel (dir. Marcel Touboul). *Synthèse par chimie douce, structure et réactivité vis-à-vis du lithium de vanadates de Co, Ni et Mn*. Th. : chimie : Amiens : 1999, 265 p.

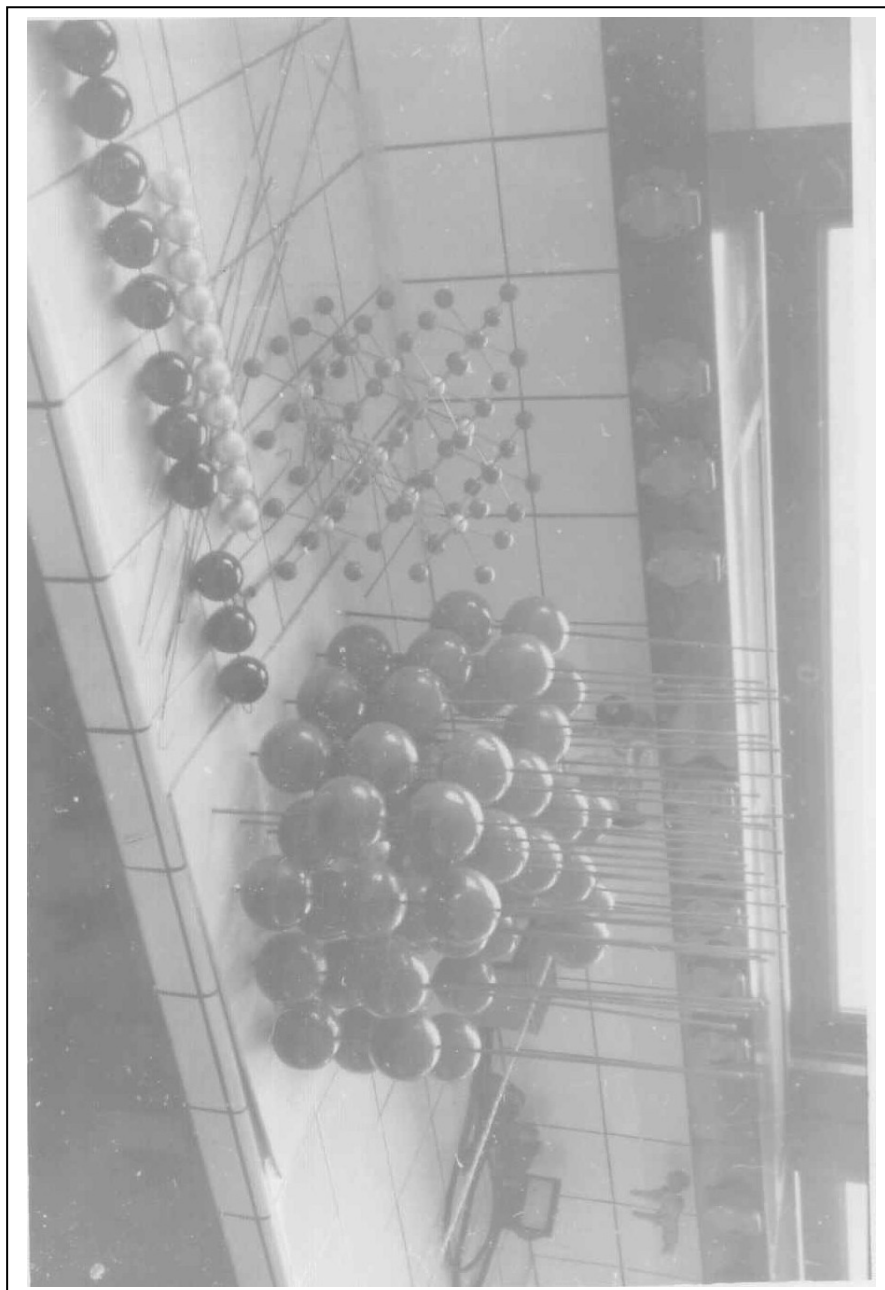
AGNOLI Fabrice (dir. Philippe Tailhades). *Élaboration par chimie douce et caractérisation de poudres fines $MnFe_3O_4$ à morphologie aciculaire. Étude de la réactivité vis-à-vis de l'oxygène, et des relations structure / propriétés magnétiques*. Th. : physique : Toulouse 3 : 2000, 147 p.

Après 2000, on trouve par année (nombre de thèses) : 2001 (1) ; 2003 (1) ; 2004 (1) ; 2005 (3) ; 2006 (1).

A.VI.2. Carte vierge pour programme informatique (années soixante).



A.VII.1. Modèle pédagogique d'une structure pyrochlore sur une paillasse (vers 1970).



Index.

- Agence nationale pour la valorisation de la recherche, 258, 282, 337, 340, 344, 366, 371, 431, 438
- Agence spatiale européenne, 20, 499, 500, 545, 555, 570
- Alcatel, 20, 251-253, 256, 262, 263, 281, 339, 342, 371, 419, 436, 467, 469, 472, 476, 478, 481, 483, 484, 487, 490, 494, 500, 501, 528, 531, 568
- Allemagne, 67, 68, 106, 128, 139, 145-147, 161, 171, 173, 238, 272, 300, 315, 317, 386, 416, 506, 507, **534-548**, 553-555, 560, 570
- amorphe, 43, 51, 52, 62, 82, 89, 107, 113, 217, 262, 287, 292, 312, 329, 362, 365, 371, 381, 382, 384, 416, 436, 447, 454, 460, 467-471, 474, 478, 480, 484, 489-500, 522, 530
- analyse thermique différentielle, 51, 110, 214, 368, 470
- Anderson John Stuart, 164, 165, 168, 169, 172, 174, 186, 270, 322, 386, 389, 390, 391, 542, 554
- Andersson Sten, 270, 272, 274, 386, 388, 389, 390, 541
- Anthony Anne-Marie, 191, 243, 262, 311, 312, 319-321, 339, 346
- applications, 4, 5, 20, 34, 40, 47, 50-52, 65, 82, 84, 86, 88, 91, 98, 102-104, 113, 116, 126, 136, 140-144, 162, 164, 168, 169, 172, 179, 182, 192, 197, 200, 201, 206, 219, 222-228, 233, 234, 237, 240, 246, 248, 250, 252, 255, 257, 262, 263, 277, 280-282, 290, 291, 302, 308, 312-324, 327, 332, 338, 339, 342, 344, 345, 354, 366, 369, 371, 379, 381, 386, 425, 427, 430-457, 466-478, 484, 485, 488, 490, 492, 495-498, 502, 503, 512, 514, 519, 528, 529, 532, 533, 538, 541, 545, 550-556, 560, 564, 566, 569, 570
- Aubry Jacques, 65, 69, 151, 152, 183, 269, 292, 295, 510
- Bell Telephone, 67, 184, 224, 251, 257, 259, 285, 442, 443, 464, 468-470, 474, 482, 483, 528, 547-550, 553, 556
- Bellevue (campus CNRS), 30, **38-44**, 85, 108, 120, 139, 140, 156, 158, 185, 191, 218-221, 227-231, 237, 243, 257, 260-262, 269-275, 280, 290, 295, 297, 311, 313, 319-323, 326-329, 336, 342, 392, 397, 398, 409, 418-420, 426, 441, 509-512, 515, 553
- Bénard Jacques, 38, 49, 52, 56, 69, 70, 82, 83-88, 91, 95-97, 104-114, 129, 144, 161, 163-171, 174, 177, **179-187**, 189, 196, 202, 216, 234, 235, 239, 240, 248, 249, 253, 254, 265, 290, 293, 296, 297, 300, 311, 313, 317, 321, 323, 357, 364, 386, 509, 513, 516, 532, 544, 564
- Bergeron (Général), 40, 91, 327, 328, 331
- Bernal J. D., 109-113, 561
- Bernier Jean-Claude, 81, 199, 283, 285, 296, 297, 412, 428
- Bertaut Félix, 65, 67, 84, 181, 186, 211, 221, 222, 233, 251, 259, 263, 269, 275, 278, 321, 361-366, 449, 466, 467, 514-516, 564
- Boilot Jean-Pierre, 4, 124, 253-258, 261, 367, 369, 380, 424, 425, 426, 433, 442, 449, 451, 453, 509, 512, 521, 552
- Caro Paul, 30, 38, 39, 47, 82, 90, 107, 108, 125, 134, 140, 142, 159, 188, 191, 206, 212, **215-235**, 256, 285, 290, 294, 295, 298, 302, 303, 322, 323, 324, 326-330, 336, 339, 344, 346, 372, 378, 379, 384, 389-394, 399, 400, 409, **418-441**, 447-449, 512, 515, 519, 525-527, 533, 553, 554, 563
- catalyse, 59, 63, 74, 113, 115, 147, 151, 162, 170, 172, 178, 180, 187, 192, 203, 224, 225, 269, 311, 313, 358, 360, 364, 428, 432, 443, 452-454, 464, 523, 540, 544, 570
- Centre national d'études en télécommunications, 4, 5, 31, 43, 46, 67, 85, 191, 259, 262, 263, 281, 419, 438, 475, 481-490, 494, 501, 569
- Centre national des études spatiales, 20, 199, 281
- Chaudron Georges, 3, 4, 32, 33, 36-39, 44, 49-52, 65, 69, **72-116**, 124-129, 134-144, 148,

- 151, 153, 160, 161, 164-189, 201, 202, 218, 222, 235-241, 246, 249, 251, 259, 262, 264, 265, 269, 272, 290, 293-300, 310, 313, 314, 316-318, 321-326, 357, 358, 360, 368, 372, 377, 409-411, 435, 509, 515, 533, 536, 544, 561, 570
- Chaudronnerie, 3, 4, 56, 57, 66, **70-73**, 82-98, 104, 109, 112-116, 122, 124, 125, 129, 130, 133, 141, 143, 148, 151, 156, 158-165, 169, 171, 175, 177-180, 182, 185, 187, 189, 191, 197-202, 211, 215, 218, 234, 235, 239, 246, 248, 250, 252, 256, 264, 265, 269, 290, 291, 295-299, 304, 310-313, 316, 323, 324, 358, 364, 367, 368, 376, 515, 535, 540, 560, 562, 563, 564
- Chevenard Pierre, 40, 44, 48, 51, 75, 91, 97, 103-106, 160, 177, 357, 361
- chimie douce, 285, 352, **366-382**, 413, 425, 426, 447, 451, 453, 454, 456, 498, 519, 527, 533
- chimie minérale, 4, 23, 32, 36, 38-40, 42, 47, **56-71**, **76-92**, 97, 99, 101, 105-107, 114-116, 120, 124-134, 137, 141, 142, 144, 151, 154-163, **166-188**, 192-197, 201-203, 207, 209, 210, 214, 215, 217, 220, 229, 234, 238, 241, 248, 249, 260-269, 272, 273, 277, 278, 280, 284, 288, 289, 291-293, 295, 299, 300, 302, 304, 309, 311, 313, 317, 320, 321, 324, 325, 334, 336, 348, 352, 356, 357, 359, 360, 361, 364, 368, 369, 371, 372, 383, 385, 389, 398, 403, 447, 462-467, 479, 485, 490, 494, 500, 502, 513, 522, 524, 532, 535, 536, 541, 544, 555, 559-565, 568, 570, 572
- chimie organique, 58, 59, 63, 70, 79, 80, 83, 87, 101, 115, 138, 139, 155, 160, 163, 164, 177, 179, 253, 268, 358, 371, 400, 407, 428, 462, 463, 521, 523-526, 533, 537, 545, 559
- Chrétien André, 3, 4, 32, 33, 39, 62, 69, 105, 108, **124-143**, 151, 158, 160, 163, 169, 170, 175, 177, 179, 201, 234, 263, 264, 267, 284, 288, 296, 297, 300, 321, 367, 391, 403, 409, 416, 462, 513, 544
- Chrétienté, 3, 4, 70, 120, 124, 125, 130-136, 141, 143, 156, 158, 160, 169, 175, 177, 179, 188, 201, 202, 207, 263-265, 269, 270, 277, 291, 294-297, 304, 325, 356, 367, 462, 464
- Cohen-Adad Roger, 292, 389, 391
- Collongues Robert, 3, 4, 90, 93, 95, 97, 120, **124-134**, 142-144, 152, 153, 171, 180, 184, 185-192, 198-202, 206, 209, 216-218, **235-267**, 275, 278, 280, 285, 288, 290-300, 303, 311, 315-321, 326, 329, 330, 336, 345, 346, 354, 356, 357, 363, 364, 367, 369-372, 378, 379, 381, 386, 389, 390, 392, 397, 403, 409-412, 418, 422-425, 434, 440, 443, 445-451, 455, 457, 466, 467, 471, 472, 479, 492, 496, 509-515, 521-524, 528, 536, 539, 540, 543, 548, 549, 554, 562, 564
- Commissariat à l'énergie atomique, 4, 20, 31, 36, 41, 44, 48, 52, 84, 92, 98, 103, 105, 154, 180-186, 199, 224, 225, 236, 239, 243, 246, 251, 258, 263, 269, 311, 314, 315, 329, 331, 337-342, 369, 371, 397, 431, 434, 435, 445, 446, 451, 465, 494, 501, 510, 516, 531, 555, 562, 567, 568
- communauté scientifique, 2, 8, 16, 17, 20, 22, 34, 43, 52, 57, 72, 84, 104, 108, 122, 127, 144, 147, 159, 167, 177, 189, 191, 196-201, 208, 278, 348, 352, 354, 381, 444, 447, 453, 461, 469, 472, 482, 485, 501, 510, 523, 547, 561, 563, 565, 571, 572
- Cot Louis, 428, 449
- cristallogénèse, 43, 45, 67, 68, 84, 85, 190, 206, 217, 235, **241-262**, 274, 275, 281, 290, 301, 303, 309, 325, 326, 329, 338, 340, 356, 364, 381, 391, 448-450, 454, 456, 468, 471, 513, 514, 522, 525, 549, 562
- de Gennes Pierre-Gilles, 195, 393, 453, 516, 517, 518
- Délégation générale à la recherche scientifique et technologique, 7, 176, 186, 189-191, 195, 199, 223-225, 262, 281, 322, 334, 342, 345, 419, 516, 563, 567
- Deschanvres Alfred, 170, 175, 179, 188, 296, 299, 300, 409, 509, 564
- diagramme de phase, 49, 50, 78, 86, 110, 214, 216, 312, 359, 492, 499
- diffraction des neutrons, 259, 383
- diffraction des rayons X, 11, 23, 46, 50-52, 59, 81, 82, 85, 88, 89, 97, 110, 135-138, 141, 162, 163, 190, 207, 222, 229, 230, 244, 250, 255-257, 273-276, 289, 291, 301, 336, 353, 356, 357, 365, 372, 382, 383-392, 397, 398, 405, 449, 454, 464, 467, 470, 500, 526, 537, 550, 551, 561, 562, 566

- Direction générale de l'armement, 20, 184, 199, 225, 258, 281, 339, 419, 452, 472, 476, 477, 481, 490-501, 555, 569
- école de recherche, 13, 17, 23, 45, 70, 75, 96, 141, 206, 207, 235, 238, 239, 277, 280, 285, 289, 297, 301, 353, 390, 457, 508, 509, 515, 531, 535, 539, 563, 565
- Électricité de France, 252, 253, 342-345, 434, 568
- électrochimie, 51, 76, 81, 87, 99, 105, 114, 156, 160, 162, 177, 189, 233, 284, 311, 313, 321, 356, 363, 367, 370, 427, 443, 449, 451, 453, 454, 478, 533
- États-Unis, 4, 20, 22, 41, 51, 67, 68, 92, 106, 107, 115, 130, 131, 145-150, 158, 186, 192-196, 201, 217, 219, 227, 234, 243, 246, 247, 250, 256, 259, 263, 271, 272, 275, 281, 282, 290, 314, 316, 322, 331, 332, 340, 344, 345, 426, 434, 442, 443, 452, 475, 481-483, 489, 497-501, 506, 507, 511, 513, 517, 531, 534, 535, 542, 543, **546-571**
- EXAFS, 216, 217, 384, 399, 454, 498, 522, 566
- Faivre René, 69, 83, 88-90, 97, 112, 151, 152, 168, 169, 510
- famille scientifique, 14, 15, 23, 32, 39, 48, 49, 56, 57, 64, 68-73, 86, 93, 96, 103, 104, 108, 116, 122, 127, 144, 158, 185, 201, 208, 297, 301, 353, 510, 536, 560, 565
- Fayard Michel, 90, 180, 185, 188, 199, 252, 296, 298, 300, 369, 392, 423, 430, 431, 445, 509, 564
- Férey Gérard, 284, 400-402, 427, 449, 450, 457, 540, 563
- ferrites, 43, 65, 83, 84, 164, 178, 179, 182, 221, 222, 237, 248, 251, 256, 259, 263, 362, 363
- ferromagnétisme, 65, 78, 140, 168, 232, 449, 526
- Figlarz Michel, 179, 187, 285, 367, 380, 442, 449
- Flahaut Jean, 61, 99, 125, 126, 134, 137-144, 151, 158, 174, 175, 183-186, 191, **210-218**, 232, 256, 263, 265, 278, 283, 285, 289, 292, 294, 298, 300, 302, 309-311, 316-318, 321, 326, 329, 335, 336, 339, 367, 368, 386, 391, 409, 424, 476, 510, 513, 528, 541, 562-565
- Foëx Marc, 61, 69, 70, 106, 112, 114, 140, 141, 168, 241, 260, 312-318, 321, 327, 328, 331, 335-337, 345, 346
- fours, 40, 62, 75-79, 87, 97-102, 105, 107, 136, 137, 140, 141, 174, 206, 220, 221, 227, 235-238, 241-247, 260, 265, 282, 298, 304, 307-309, 312-315, 319, 326-340, 343-348, 356, 357, 381, 388, 417, 438, 450, 453, 462, 514, 520, 529, 537, 564, 568
- Freundlich William, 136, 179, 264, 265, 356, 409, 510
- Friedel Jacques, 38, 43, 45, 48, 79, 80, 91, 155, 169, 180, 181, 192-195, 269, 275, 393, 424, 447, 456, 514-518, 532, 550, 551
- frontières, 2, 6, 15, 16, 48, 52, 53, 61, 63, 76, 80, 85-87, 92, 116, 160, 166, 172, 177, 180, 181, 196, 197, 202, 203, 301, 302, 318, 319, 358, 390, 412, 434, 435, 444, 445, 479, 490, 496, 515, 517, 533, 534, 540, 551, 560, 566
- Galy Jean, 125, 130, 132, **273-280**, 284, 285, 291, 293, 296-303, 356, 364, 372, 377, 378, 384-393, 397-405, 410, 424, 428-439, 449, 451, 455, 471, 472, 493, 509-513, 521-528, 533, 539, 546-549, 554, 564
- Goodenough John, 270-275, 278, 280, 283, 286, 393, 400, 516-518, 536, 539, 547-549-554
- Hackspill Louis, 32, 66, 69, 85, 104-106, 135, 151, 160, 328, 368, 369, 534
- Hagenmuller Paul, 3, 4, 33, 91, 120, **124-134**, 142-144, 158, 179-188, 191, 198, 201, 207, 217, 218, 250, **263-300**, 321, 325, 328, 354, 356, 363, 364, 367, 371, 372, 375, 384, 385, 392, 403, 405, 409, 411-424, 431, 434, 442, 448, 455-457, 460-472, 500, 509-515, 520, 524, 534-548, 554, 562-564, 570
- Hägg Gunner, 114, 165, 171, 211, 541
- hautes températures, 23, 40, 50, 56, 57, 61-63, 70-79, 87, 91, **97-109**, 116, 120, 134-141, 144, 148, 151, 152, 161, 162, 171-175, 178-186, 190, 192, 206, 209-221, 224, 234-250, 254, 255, 257-264, 269, 275, 276, 279, 290, 291, 295, **299-357**, 362-369, 377-383, 389-393, 418, 425, 431, 443, 448-456, 462, 467,

- 498, 502, 514, 517, 518, 522, 533, 541, 560-564, 568, 569, 572
- Hedvall J. Arvid, 109, 112, 113, 167-172, 316, 561
- Héroid Albert, 66, 151, 152, 172, 291, 292, 295, 299, 368, 372, 378-380, 396, 404, 409, 430, 449, 455, 509, 510, 517, 521, 527, 528, 534, 535, 564, 568
- IBM, 184, 251, 281, 282, 398, 428, 434, 437, 455, 517, 548, 549, 556
- identité, 3, 7, 9, 13, 16, 17, 18, 23, 53, 59, 96, 127, 136, 138, 156, 184, 196, 204, 207, 208, 217, 222, 280, 301-305, 311, 323, 378, 380, 403-405, 441, 453, 506-508, 518, 520, 522, 537, 543, 544, 550, 555, 556, 565-567, 572
- industrie, 2, 5-7, 15, 19-23, 32, 34, 40, 41, 45-52, 56, 57, 62-65, 74-86, 90-98, 102-107, 113, 126, 129, 143, 144, 152, 161, 164, 168, 171, 172, 177-184, 189-193, 197, 200, 201, 206, 221, 222, 225, 240, 245-248, 251-258, 282, 285, 289, 298, 312-320, 323, 328-332, 337-340, 343, 352, 355-361, 366, 369-372, 377, 384, 393, 402, 404, 408-411, 414, 415, 419, 425, **428-443**, 450-456, 460-463, 467, 470-474, 479, 483, 488, 490, 494-496, 499-503, 506, 509, 512, 527-532, 538, 545, 549-555, 559, 560, 565-570
- ingénieurs, techniciens, administratifs, 11, 14, 19, 33, 38, 40, 41, 51, 78, 88-90, 96, 102, 108, 157, 197, 221, 226, 237, 241, 244, 252, 275, 280, 287, 293, 294, 303, 304, 314, 329, 331, 333, 337, 338, 345, 346, 361, 370, 392, 402, 406, 407, 408, 410, 412, 417, 419, 420, 428, 429, 469, 472, 494, 508, 510, 522, 565, 570
- Institut de recherche en sidérurgie, 4, 31, 41, 48, 66, 92, 98, 154, 197, 234, 269, 311, 314, 346, 531
- Institut français du pétrole, 31, 231, 442, 443
- instruments, 4, 5, 8, 11, 17, 19, 21, 33, 39, 43, 46, 48, 50, 52, 72, 75-77, 85-89, 96, 103, 107, 116, 122, 134, 136, 156, 158, 172, 238, 257, 287, 288, 292, 303, 313, 318, 319, 338, 340, 348-354, 365, 369, 377, 382-387, 392-394, 397-399, 402-407, 420, 424-427, 434, 442, 445, 454, 456, 472, 500, 503, 508, 511, 514, 521, 553, 554, 559-566
- Jolibois Pierre, 60, 69, 76, 77, 81, 90, 99-102, 105, 106, 161, 165, 170, 186, 328, 358, 435, 441, 534
- Klemm Wilhelm, 68, 161, 165, **172-174**, 188, 268, 270, 283, 358, 524, 535-538, 554
- Le Chatelier Henry, 32, 69, **72-83**, 86, 91, 94, 97-105, 127, 311, 359, 360, 536
- Lebeau Paul, 38, 48, **61-66**, 69, 70, 77, 78, 83, 85, **96-108**, 116, 130, 133, 137, 141, 158-162, 175, 201, 210, 214, 291, 299, 309, 310-316, 320, 325, 328, 331, 441
- liaison chimique, 143, 144, 149, 150, 165, 166, 174, 185, 190, 191, 223, 226, 280, 371, 383, 390, 398, 400, 443, 468, 492, 521, 522, 532, 538, 555
- Livage Jacques, 4, 124, 152, 191, 249, 253, 254, 294, 300, **367-384**, 403, 411, 412, 422, 423, 432, 435-438, 446, 449, 452, 453, 457, 509, 531, 563
- Lucas Jacques, 4, 33, 65, 66, 69, 83, 124, 132, 188, 247, 267, 268, 283, 292-300, 371, 378, 382, 400-404, 413, 436-439, 448, 450, 452, 457, **462-503**, 509-517, 521, 522, 528, 547-549, 556, 563, 564, 569
- LURE, 383-385, 442
- Magnéli Arne, 165, 272, 274, 541
- mandarin, **14**, 15, 19, 32, **36-41**, 48, 52, 56, 66, 69, 74, 80-85, 90, 93, 97, 99, 101, 124, 125, 132, 133, 170, 174, 179, 182, 184, 188, 191, 200-203, 218, 250, 267, 294, 299, 300, 303, 320, 325, 348, 378, 409, 410, 420-423, 448, 454-457, 468, 471, 500, 508, 509, 561-564
- Materials Research Society*, 148, 193, 452, 489, 550, 571
- Materials Science*, 194, 371, 446, 506, 507, 531, 549, 550, 551, 552, 555
- matériaux, 5, 6, 20, 21, 23, 79, 80, 92, 94, 120, 121, 126, 131, 142-145, 148-159, 177, 181, 182, **187-203**, 215-217, 224, 225, 231-236, 239-263, 270, 272, 275, 277, 280-282, 285, 286, 290-295, 302, 312, 315, 319-326, 330, 331, 335-340, 344-348, 352-354, 361, 365, 366, 369, 371-376, 380-385, 389-394, 399-403, 407, 412, 414, 417-420, **425-473**, 479, 483-485, **489-502**, 506, 510, 514-571

matière condensée, 254, 255, 422-427, 433, 442, 453, 457, 533

Michel André, 4, 36, 61, 62, 81, 89, 94-97, 106, 112, 129, 160, 163, 168, 170, 180-192, 199, 202, 234, 239, 262, 265, 266, 269, 283, 285, 290, 295-298, 301, 311, 317, 321, 345, 357, 360, 364-369, 397, 420, 450, 509, 514, 530

microscopie électronique, 11, 44, 67, 190, 217, 230, 231, 234, 253, 256, 274, 287, 290, 298-303, 331, 352, 372, **385-393**, 399-404, 441, 443, 449, 454, 492, 498, 532, 541, 553, 566

Moissan Henry, 32, 69, 74, 99-105, 141, 214, 217, 309, 536, 549

Mott Nevill, 45-47, 53, 91, 92, 113, 114, 166, 169, 275, 515, 554

nano-matériaux, 366, 378, 449, 453, 455, 457, 498, 502, 527, 545, 556

NASA, 344, 498, 499

Néel Louis, 43, 46, 65, 84, 90, 91, 151, 168, 186, 221, 233, 251, 259, 263, 275, 361, 364-366, 514, 515, 538

non stœchiométrie, 113, 120, 129, 130, 160, 164-166, 168, 170-172, 179, 227, 235, 236, 257, 272, 276, 290, 298, 301, 322, 324, 357, 385-393, 493, 513, 539-541, 550, 551, 555, 560, 566

ONERA, 31, 36, 48, 180, 184, 199, 339, 342, 345, 442, 443, 531

paramagnétisme, 229, 261, 323, 449, 526

Pâris René, 40, 48, 59, 69, 81, 105, 177, 186, 269, **359-366**, 372, 377, 396, 412, 433, 435, 441, 453, 510, 514, 562, 564

Pechiney, 5, 48, 177, 234, 281, 360, 361, 434, 441, 445, 531

Percheron-Guégan Annick, 235, 300, 323, 410, 419, 444, 446, 512

physique des solides, 5, 20, 21, 45, 46, 53, 72, 115, 125, 170, 172, 180-182, 185, 194, 195, 221, 229, 232, 252, 253, 257, 262, 271, 275, 295, 342, 381, 420, 424, 443, 449, 464, 501, **514-519**, 533, 549, 550, 553, 566, 568

Picon Marius, 69, 99, 102, 120, 137, 139, 141, 142, 174, 175, **210-215**, 221, 309, 310, 329

pile à combustible, 255, 281, 290, 425, 431, 442, 451, 517, 530, 553, 556, 568

PIRMAT, 199, 282, 352, **443-448**, 531

polycristal, 206, 235, 247, 259

Pouchard Michel, 3, 4, 70, 73, 124, 125, 128, 132, 144, 191, 265-267, **272-279**, 282, 284, 298, 322, 367, 378, 384, 386, 392-395, 399, 400, 404, 409, 412, 416, 420, 421, 424, 434-438, 445, 449, 450, 453, 463, **512-520**, 524, 532, 535, 541, 549, 552, 553, 563

Prigent Jacques, 263, 268, 295, 300, **460-465**, 472, 500, 510, 568

Raveau Bernard, 188, 283, 293, 299, 300, **392-394**, 428, 449, 455, 471, 517, 518, 522, 540, 563

récit légendaire, **3, 4**, 17, 18, 120, 123, 124, 127, 128, 133, 142, 143, 158, 208, 264, 293, 302, 305, 453, 517, 536, 543, 558, 565-567, 570-572

réfractaires, 5, 40, 48-51, 56, 57, 70, 71, 78, 80, 82, 84, 88, 94, 98-105, 116, 140, 174, 175, 178, 180-182, 195, 206, **221-251**, 257, 260, 261, 272, 290, 299, 304, 308, **310-329**, 335-340, 345-348, 356, 476, 559, 560, 562, 564, 567, 568, 571

research-technology, 11, 319, 331, 560

résonance magnétique nucléaire, 216, 233, 253-255, 346, 370, 383-385, 399, 422, 454, 498, 513

résonance paramagnétique électronique, 223, 230, 253-258, 290, 369-372, 383-385, 399, 403, 422, 448, 454

Revcolevschi Alexandre, 4, 187, 241, 242, 249, 261, 390, 410, 412, 422, 423

Rhône-Poulenc, 5, 20, 223, 224, 281, 282, 323, 339, 370, 408, 414, 415, 419, 421, 432-440, 445, 446, 452, 530, 531, 546, 569

Ribes Michel, 428, 476

Rohmer Raymond, 33, 69, **131-135**, 151, 169, 175, 179, 183, 263, 288, 460, 462, 464, 500, 510

Rousset Abel, 125, 126, 360-366, **370-373**, 377-380, 392, 398, 406, 407, 412, 427-429,

- 432-440, 447-451, 455, 502, 509, 510, 528, 529, 544
- Rouxel Jean, 4, 132, 133, 179, 188, 217, 265-267, 284, 285, 292, 294, 298-300, 364, 367, 368, **370-381**, 391, 411, 413, 418, 427, 434, 449, 453, 462, 463, 509, 517, 522, 525, 527, 531, 534, 541, 563
- Saint-Gobain, 5, 20, 51, 105, 184, 243, 245, 281, 311, 314, 333, 337, 342, 369, 371, 434, 438, 440, 445, 446, 453, 468, 476, 481, 489, 501, 530, 531
- Sergent Marcel, 449, 464, 476, 500, 539
- Société française de chimie, 6, **159-162**, 166-169, 172-175, 179, 181, 184, 185, 188, 211, 250, 286, 314, 316, 318, 354, 384, 457, 510, 514
- solution solide, 44, 78, 87, 113, 129, 164, 237
- spectroscopie, 67, 80, 141, 183, 206, 222, 223, 226-235, 249, 254, 257, 258, 290, 369, 384, 385, 397, 399, 402, 405, 448, 452, 491, 493, 516, 521, 566
- structure-propriétés, 45, 53, 112, 120, 143, 144, 162-167, 185, 192, 199-202, 216, 247, 248, 261, 289, 354, 357, 358, 364, 385, 400, 448, 450, 454, 467, 492, 514, 525, 526, 532, 538, 547, 552, 555, 562, 564
- superconducteur ionique, **249-254**, 290, 425, 451, 556, 568
- supraconducteur, 393, 531, 556
- surfaces, interfaces, 23, 44, 47, 53, 60, 61, 75, 80, 85-88, 97, 111, 113, 126, 138, 149, 151, 160-162, 168, 170, 178, 180, 183, 184, 187-191, 194, 196, 199-202, 231, 234, 248, 311, 316, 321, 331, 333, 342, 343, 346, 352, 353, 357-359, 365, 379, 382, 394-398, 401, 419, 420, 425-428, 443-446, 450, 451, 454, 489, 498, 516, 527, 540, 570, 571
- Tarascon Jean-Marie, 285, 394, 441-443, 449, 452, 457, 563
- théorie des bandes, 45, 46, 50, 165, 166, 180, 227, 230, 248, 273, 276, 400, 449
- théorie du champ de ligands, 228, 229, 268, 535
- Thomson-CSF, 43, 46, 67, 105, 255, 281, 333, 419, 476, 477, 489, 529, 531
- Tournoux Michel, 4, 37, 130-133, 188, 218, 264-268, 274, 278, 283-285, 292, 294, 364, 367, 368, 370, 372, 374, 375, 380, 381, 386, 398, 411, 412, 416-418, 426, 429, 434-436, 439, 449, 451, 462-464, 478, 508, 512, 513, 524, 528, 530, 542, 544
- Tridot Gabriel, 69, 135, 177, 409, 510
- triple hélice, 6, 329, 460, 470, 473, 490, 501, 569, 571
- Trombe Félix, 36, 38, 40, 51, 66, 69, 70, 103, 105, 106, 108, 112, 114, 116, 120, 130, 133, 139-143, 158, 160, 161, 163, 168, 174-177, 182-188, 201, 202, 212, 216, **218-221**, 224-227, 231, 234, 241, 260, 263, 265, 269, 275, **289-300**, 309-319, 323, 326-337, 340, 344, 345, 348, 356, 406, 409, 416, 418, 420, 422, 509, 515, 553, 564, 565
- Union européenne, 372, 469, 498, 499, 507, 544-546, 555, 569
- Union internationale de chimie pure et appliquée, 106, 170, 174, 186, 358
- Urbain Georges, 36, 38, 66, 69, 72, 74, 79, 80, 81, 82, 99, 100, 101, 103, 105, 106, 108, 127, 134, 139, 140, 160, 218, 219, 220, 223, 289, 317, 326, 327, 329, 553
- Vivien Daniel, 4, 79, 124, 125, 144, 215, 235, 246, 249, 253, 254, 258, 289, 369, 370, 372, 378, 384, 403, 422, 433, 435, 448, 449, 452, 467, 491, 514, 515, 536, 551
- Wadsley David, 272, 303, **386-391**, 554
- Wyart Jean, 43-47, 52, 53, 60, 91, 105, 106, 112, 114, 141, 160, 163, 217, 323, 515
- zéolithes, 382, 401, 454

Sources et bibliographie.

Sources et bibliographie.....	629
1. <i>Archives orales</i>	630
2. <i>Archives de la SFC et du CNRS</i>	631
Société française de chimie.....	631
Rapports généraux du CNRS.....	631
Rapports d'activité de laboratoires CNRS.....	632
3. <i>Sources imprimées</i>	634
Thèses de chimie.....	634
Notices des titres et travaux scientifiques.....	636
Documents divers.....	636
4. <i>Bibliographie</i>	638
Sciences physiques et chimiques.....	638
Sciences humaines et sociales.....	645
Histoire et sociologie des sciences et des techniques.....	646

1. Archives orales

Entretiens réalisés par Bernadette Bensaude-Vincent. (disponibles sur le site Internet de la SFC : <http://www.sfc.fr/Material/hrst.mit.edu/index.html>)

BOILOT Jean-Pierre. *Interview* (Palaiseau, 2000), 4 p.
CARO Paul. *Interview* (Paris, 2002), 12 p. (avec J. Claro-Gomès)
COLOMBAN Philippe. *Interview* (Paris, 2003) : 6 p.
DE GENNES Pierre-Gilles. *Interview* (Paris, 2002) : 7 p. (avec H. Arribart)
FRIEDEL Jacques. *Interview* (Paris, 2001) : 12 p. (avec H. Arribart)
GOODENOUGH John. *Interview* (2001) : 33 p. (avec A. Hessenbruch)
HAGENMULLER Paul. *Interview* (Paris, 2001) : 8 p. (avec H. Arribart)
LIVAGE Jacques. *Interview* (Paris, 2001), 5 p.

Entretiens réalisés par Bernadette Bensaude-Vincent et Pierre Teissier.

KAHN-HARARI Andrée. *Interview* (Paris, 2004) : 16 p.
PEREZ Y JORBA Monique., *Interview* (Boulogne, 2004) : 5 p.
VITORGE Marie-Claude. *Interview* (Paris, 2007) : 13p.

Entretiens réalisés par Pierre Teissier.

ADAM Jean-Luc. *Interview* (Rennes, 2006), 10 p.
ANTIC-FIDANCEV Elisabeth. *Interview* (Paris, 2006), 9 p.
BONINO Christiane. *Interview* (Toulouse, 2006), 6 p.
CARO Paul. *Interview* (Paris, 2005), 28 p.
DEXPERT Hervé. *Interview* (Toulouse, 2006) : 11 p.
ÉTOURNEAU Jean. *Interview* (Bordeaux, 2005) : 15 p.
FLAHAUT Jean & RIVET Jacques. *Interview* (Paris, 2005) : 14 p.
GALY Jean. *Interview* (Toulouse, 2006) : 29 p.
HÉROLD Albert. *Interview* (Nancy, 2007) : 8 p.
JANSEN. *Interview* (Stuttgart, 2005), 8 p.
JÉRÔME Denis. *Interview* (Orsay, 2006) : 20 p.
LEFRANT Serge. *Interview* (Nantes, 2006) : 16 p.
LUCAS Jacques. *Interview* (Paris, 2005) : 19 p.
MONDANGE Hélène. *Interview* (Paris, 2004) : 7 p.
MORADPOUR Alexandre. *Interview* (Orsay, 2006) : 17 p.
OUVRARD Guy. *Interview* (Nantes, 2006) : 9 p.
POUCHARD Michel. *Interview* (Paris, 2004) : 34 p.
POUCHARD Michel. *Interview* (Bordeaux, 2004b) : 13 p.
ROUSSET Abel. *Interview* (Toulouse, 2006) : 16 p.
SERREAU Danielle. *Interview* (Paris, 2004) : 20 p.
SIMON Arndt. *Interview* (Stuttgart, 2005) : 6 p.
TOURNOUX Michel. *Interview* (Nantes, 2006) : 17 p.
VIVIEN Daniel. *Interview* (Paris, 2004) : 19 p.

2. Archives de la SFC et du CNRS

Société française de chimie.

SCF, 1963-1975 : *Procès-verbaux originaux des Séances du Conseil de la Société chimique de France de 1963 à 1975.*

Pour les documents CNRS.

Si la côte est indiquée entre crochets, alors la source provient du service de Gif-sur-Yvette. Sinon, dans le cas des rapports d'activité de laboratoire, elle provient des archives de laboratoires.

Rapports généraux du CNRS.

[Côte : 990001 Carton 23]

RC CNRS, 1959 : *Rapport de conjoncture.* CNRS, novembre 1959.

RC CNRS, 1964 : *Rapport national de conjoncture scientifique.* 1963-1964.

RC CNRS, 1964b : *Résumé de proposition des sections,* 1963-1964.

RC CNRS, 1969 : *Rapport national de conjoncture scientifique.* CNRS, 1969.

RC CNRS, 1974 : *Rapport national de conjoncture scientifique.* CNRS, 1974.

RC CNRS, 1984 : *Rapport de conjoncture du CNRS.* 1984.

RC CNRS, 1989 : *Rapport de conjoncture du CNRS.* 1989.

[côte : 990001 Carton 64]

CNRS, 1947 : *Notes documentaires et études n°608* (25 avril 1947).

CNRS, 1948 : *Séance plénière du Comité National de la Recherche Scientifique* (2 juin 1948).

CNRS, 1949a : *Annuaire du Centre National de la Recherche Scientifique* (1949) (indications pour 1947-48).

CNRS, 1949b : *Bulletin du CNRS Série A n°1* (mars 1949).

CNRS, 1949c : *Bulletin du CNRS Série A n°2* (? 1949).

CNRS, 1984 : *Schéma directeur du CNRS* (18 janvier 1984). [côte : 990049 Carton 1].

CNRS, 1999 : *La microscopie électronique en 1999. État des lieux, enjeux et perspectives* (CNRS, juin 1999). [côte : 990049 Carton 1].

RA CNRS, 1945 : *Compte-rendu de l'activité du CNRS de septembre 1944 à octobre 1945.*

RA CNRS, 1951 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS.* Mai 1950-octobre 1951.

RA CNRS, 1952 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS.* Mai 1951-octobre 1952.

RA CNRS, 1953 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1952 - Octobre 1953).

RA CNRS, 1954 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1953 - Octobre 1954).

[côte : 990001 Carton 65]

RA CNRS, 1957 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1956 - Octobre 1957).

RA CNRS, 1958 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1957 – Octobre 1958).
 RA CNRS, 1959 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1958 – Octobre 1959).
 RA CNRS, 1960 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1959 – Octobre 1960).
 RA CNRS, 1961 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1960 – Octobre 1961).
 RA CNRS, 1962 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1961 – Octobre 1962).
 RA CNRS, 1963 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1962 - Octobre 1963).
 RA CNRS, 1964 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1963 – Octobre 1964).
 RA CNRS, 1965 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (Octobre 1964 - Octobre 1965).
 RA CNRS, 1966 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (1^{er} octobre 1965 - 31 décembre 1966).
 RA CNRS, 1967 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (1967).
 RA CNRS, 1968 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (1968).
 RA CNRS, 1969 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (1969).
 RA CNRS, 1970 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (1970).
 RA CNRS, 1973 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (1973).
 RA CNRS, 1974 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (1974).
 RA CNRS, 1980 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (1979-1980).
 RA CNRS, 1982 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (1981-1982).
 RA CNRS, 1990 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (1990).
 RA CNRS, 2000 : *Rapport sur l'activité générale du CNRS* (2000).
 RCP, 1966 : *Rapport d'activité sur les Recherches coopératives sur programme* (1963-1966).

[Côte 020051 SC, Cartons 1 à 6]

Lettres bleues : *Lettre d'information du CNRS* (1971-1987).
 Lettres chimie : *Lettres des sciences chimiques du CNRS*.
 Lettres SPI : *Lettres des départements scientifiques du CNRS. Sciences pour l'ingénieur*.
 CNRS-DGRST, 1977 : *Rapport du groupe de prospective CNRS-DGRST de chimie du solide et de métallurgie*. 1977.
 CNRS, 1980 : *Répartition des publications 1980 dans les laboratoires de chimie*. Paris : CNRS, 1980. *Dossier publications et abonnements*.
 CNRS, 1988 : *Facteurs d'impact. Revues de chimie. Dossier publications et abonnements*.
 CNRS, 1989 : *Le CNRS en région Centre. Humanités, sciences, nature*. Paris : CNRS, 1989.
 CNRS, 1992 : *Présentation du département des sciences chimiques du CNRS*. 1992.

Rapports d'activité de laboratoires CNRS.

Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide (LCAES, Paris).

RA LA 302, 1980 : *Rapports scientifiques du LA n°302* (1980).
 RA LA 302, 1984 : *Rapports scientifiques du LA n°302* (1984).
 RA LA 302, 1986 : *Rapports scientifiques du LA n°302* (1986).
 RA LA 302, 1990 : *Rapport scientifique de l'URA n°302* (1990).

Laboratoire de chimie du solide (LCS, Bordeaux) puis Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux (ICMCB).

RA LCS, 1975 : *Rapport d'activité 1975*. LCS, 1975.
RA LCS, 1982 : *Rapport d'activité 1982*. LCS, 1982.
RA LCS, 1993 : *Rapport d'activité (1989-1993)*. LCS, 1993.
RA ICMCB, 2001 : *Rapport d'activité (1998-2001)*. Trois tomes. ICMCB, 2001.

Laboratoire de chimie minérale structurale (LCMS, Paris).

RA LCMS, 1976 : *Rapport d'activité du Laboratoire associé n°200 « chimie minérale et structurale »*. Paris, 1976.
RA LCMS, 1987 : *Rapport d'activité du Laboratoire de chimie minérale et structurale*. Paris, 1987.

Laboratoire de l'énergie solaire (LES, Odeillo). [côte : 850001 Carton 14]

RA LES, 1969 : *Rapport d'activité du Laboratoire de l'énergie solaire*. Octobre 1967 – Juin 1969.
RA LES, 1970 : *Rapport d'activité du Laboratoire de l'énergie solaire*. Juin 1969 – Octobre 1970.
RA LES, 1972 : *Rapport d'activité du Laboratoire de l'énergie solaire*. 1967-1972. 7 annexes.
RA LES, 1974 : *Rapport d'activité du Laboratoire de l'énergie solaire*. Janvier 1973 – Avril 1974.
RA LES, 1977 : *Rapport d'activité du Laboratoire de l'énergie solaire*, 1977.

Laboratoire des terres rares (LTR). [côte : 930007 Carton 3]

RA LTR, 1964 : *Rapport d'activité du Laboratoire des terres rares*. Octobre 1963 – Octobre 1964.
RA LTR, 1965 : *Rapport du Comité directeur du Laboratoire des terres rares*. 28 avril 1965.
RA LTR, 1967 : *Rapport du Comité directeur du Laboratoire des terres rares*. 11 juillet 1967.
RA LTR, 1968 : *Rapport du Comité directeur du Laboratoire des terres rares*. Novembre 1968.
RA LTR, 1969 : *Rapport d'activité Laboratoire des terres rares 1963-1969*.
RA LTR, 1969b : *Rapport du Comité directeur du Laboratoire des terres rares*. 25 mars 1969.
RA LTR, 1970 : *Rapport du Comité de direction du Laboratoire des terres rares*. 9 octobre 1970.
RA LTR, 1972 : *Rapport du Comité de direction du Laboratoire des terres rares*. 8 mars 1972.
RA LTR, 1975 : *Rapport du Comité de direction du Laboratoire des terres rares*. 4 juin 1975. [dernier rapport d'activité du LTR].
Rapport Caro, 1977 : *Rapport de Monsieur Caro sur l'affaire du Laboratoire des terres rares*, 9 mai 1977.
RA LTR, 1980 : *Rapport scientifique de la formation ER 060210 « Éléments de transition dans les solides » (1977-1980)*.
RA LTR, 1982 : *Rapport scientifique de la formation ER 210 (1980-1982)*.
RA LTR, 1988 : *Rapport scientifique de la formation ER 210 (1984-1988)*.

Laboratoire des ultra-réfractaires (LUR, Montlouis). [côte : 850001 Carton 14].

LUR, 1971 : *Rapport d'activité du Laboratoire des ultra-réfractaires*, 1971.

Laboratoire des verres et céramiques (LVC, Rennes).

ISNOG, 1982 : *First international symposium on halide and other nonoxide glasses*. Cambridge (UK) : 1982.

ISNOG, 1983 : *Second International symposium on halide glasses*. Troy (USA) : 1983.

NOGSn, 1986-1998 : *Non-Oxide Glass Society news*. Rennes : novembre 1986 à 1998.

RA LVC, 2002 : *Rapport d'activité*. Laboratoire des verres et céramiques (1999-2002).

3. Sources imprimées

Thèses de chimie.

ANTOINE J. *Étude par RPE de la localisation d'ions étrangers dans la structure de l'alumine β''* . Th. : ingénieur : Paris : 1976.

BOILOT J.-P. *Contribution à l'étude de problèmes fondamentaux spécifiques aux superconducteurs ioniques de type alumine β et alumine β'' . Relations structure-conductivité électrique*. Th. : sciences : Paris : 1975.

BRIANÇON D. *Contribution à l'étude des aluminates de sodium*. DES : Paris : 1962.

COLLONGUES R. *Contribution à l'étude des propriétés et des modes de décomposition de la phase protoxyde de fer*. Th. : sciences : Paris : 1954.

COLOMBAN P. *Contribution à l'étude des mécanismes de conductivité dans les composés de type β et β'' Al_2O_3* . Th. : Paris : 1979.

CONNAN J.P. *Réalisation d'un four à haute température (1600° – 2100°C) en atmosphère oxydante*. Th. : ingénieur : Paris : 1973.

DHALENNE G. *Sur l'application du chauffage par concentration de rayonnement à la purification d'oxydes réfractaires et à des expériences de croissance cristalline à haute température (bicristaux et matériaux composites)*. Th. : 3^e cycle : Paris : 1972.

FIGLARZ M. *Étude de poudres de cobalt : mécanisme de production et morphologie*. Th. : sciences physiques : Paris : 1966, 60 p.

FRAGNAUD Pascal. *Nouveaux thiophosphates de métaux de transition obtenus par chimie douce et chimie dure*. Th. : sciences : Nantes : 1992, 210 p.

GALTIER F. *Sur la mise au point d'un four à plasma et son adaptation à l'élaboration de monocristaux de matériaux ultra-réfractaires. Etude de quelques propriétés des monocristaux de chaux*. Th. : sciences : Paris : 1968.

GOURIER D. *Étude par RPE de défauts localisés dans les plans de conduction de l'alumine β* . Th. : État : Paris : 1980.

HAGENMULLER P. *Contribution à l'étude des nitrites en solution*. Th. : sciences : Paris : Masson & Cie, 1950.

LE CARS Y. *Contribution à l'étude de la structure et des propriétés des aluminates de sodium (aluminés β et β'') en vue de leur utilisation comme électrolyse solide*. Th. : ingénieur : Paris : 1974.

LEPRINCE-RINGUET F. *Contribution à l'étude de l'action du carbone à haute température sur les oxydes réfractaires : zircon pure et stabilisée et oxydes des lanthanides*. Th. : sciences : Paris : 1968.

LUCAS J. *Préparations, propriétés et étude infrarouge de sels complexes halogénés et oxyhalogénés des ions uranyle, diuranyle et triuranyle*. Th. : sciences physiques : Rennes : 1964, 38 p.

MAZIÈRES C. *Étude, sur microéchantillons, des phénomènes thermiques liés aux transformations structurales*. Th. : sciences physiques : Paris : 10 janvier 1961, 48 p.

MONTEL G. *Contribution à l'étude des mécanismes de synthèse de la fluorapatite*. Th. : sciences physiques : Paris : 10 octobre 1956, 57 p.

PADIOU J. *Sur des sulfures et oxysulfures d'uranium et potassium*. Th. : sciences physiques : Rennes, mai 1969, 50 p.

PÂRIS R. *Contribution à l'étude des alliages ternaires*. Th. : sciences physiques : Paris, 1934, 86 p.

REVCOLEVSCHI A. *Sur l'application d'une méthode de chauffage par concentration de rayonnement à la diffractométrie X jusqu'à 3000° et à la croissance cristalline à très haute température*. Th. : sciences : Paris : 1969.

ROHMER R. *Études sur le sulfate de nickel et le sulfate de cobalt*. Th. : sciences physiques : Strasbourg : 1939.

ROUSSET A. *Contribution à l'étude des oxydes simples et mixtes de fer, de chrome et d'aluminium*. Th. : sciences physiques : Lyon, 19 septembre 1969, 235 p. (n° ordre : 593).

ROUXEL J. *Sur deux nouvelles familles de composés de l'aluminium : les oxyhalogénures et les thiohalogénures*. Th. : sciences physiques : Bordeaux : 1961 (octobre), 65 p.

SERGENT M. *Sur des thiomolybdites, des thiotungstites et des thiochromites alcalins*. Th. : sciences physiques : Rennes, mai 1969, 68 p.

TROMBE F. *Essai sur la métallurgie des terres rares*. Th. : Paris : Masson, 1936.

STÖCKER J. *Contribution à l'étude des propriétés des solutions solides réfractaires à base de zircon et de la stabilisation de la zircon cubique*. Th. : ingénieur : Paris : 1960.

TUETA R. *Sur l'élaboration et l'étude de quelques propriétés de monocristaux super-réfractaires : oxyde de calcium et oxyde de néodyme*. Th. : 3^e cycle : Paris : 1972.

Notices des titres et travaux scientifiques.

BASTIEN P. *Notice sur les titres et travaux scientifiques*. 1954.

BÉNARD J. *Notice sur les titres et travaux scientifiques*. 1968, 1970, 1976, 1978.

CHRÉTIEN A. *Notice sur les titres et travaux scientifiques*. Paris : Gauthier-Villars, 1941, 1950, 1951.

COLLONGUES R. *Titres et travaux scientifiques*. 1979.

FLAHAUT J. *Notice sur les titres et travaux scientifiques*. 1976, 1982, 1983.

HACKSPILL L. *Notice sur les titres et travaux scientifiques*. 1938.

HAGENMULLER P. *Notice de titres et travaux*. 1960, 1977, 1988, 1998.

JOLIBOIS P. *Notice sur les titres et travaux scientifiques*. Paris : 1937.

POUCHARD M. *Notice des titres et travaux scientifiques*. Bordeaux : 2005.

ROUXEL J. *Titres et travaux scientifiques*. 1985, 1988.

VIVIEN D. *Titres et travaux scientifiques*. 1999.

Documents divers.

ADS, 1997 : *Annuaire de l'Académie des sciences*. Paris, 1997.

BÉNARD J. Ce que la Chimie peut apporter aux jeunes. *Journées d'information de la chimie*. ENSCP, 22-27 septembre 1958 (Union des physiciens), p. 9-16.

BÉNARD J. *Discours* (épée d'académicien). Paris : 26 avril 1980.

BOULLÉ A. *Pierre Jolibois (1884-1954)*.

CECM, 1954 : *Centre d'études de chimie métallurgique (Laboratoire de Vitry du CNRS)*. Paris : J. & R. Sennac, 1954.

CHAMPETIER G. *Notice sur la vie et l'œuvre scientifique de Paul Lebeau*. Séance du 18 septembre 1961.

CHAUDRON G. *Notice sur les titres et travaux scientifiques*. Chartres : Imprimerie Durand, 1954.

CHAUDRON G. *Discours prononcé lors de l'Hommage à Paul Lebeau* (28 novembre 1957).

CHRETIEN, 1973 : *Jubilé scientifique du professeur André Chrétien*. Paris : Gauthier-Villars, 1973.

CNRS, 1975 : *Annuaire de Chimie du CNRS 1975-1976*. Paris : CNRS, 1975.

- CNRS, 1975b : *Annuaire de Physique du CNRS 1975-1976*. Paris : CNRS, 1975.
- COMES, 1980 : *Rapport d'activité du Commissariat à l'énergie solaire*, 1980.
- ENSCP, 2005 : *Annuaire de l'ENSCP 2004-2005*. Paris : Association des anciens élèves, 2005.
- ESPCI, 2004 : *Annuaire de l'ESPCI 2004*. Paris : Association des anciens élèves, 2004.
- IAE, 1968 : *Sol-Gel Processes for Ceramic Nuclear Fuels. Proceedings of a Panel, Vienna, 6-10 May 1968*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1968.
- IUF, 1994 : *Rapport d'activité 1994. Institut universitaire de France*. Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche.
- LACOMBE P. *La vie et l'œuvre de Paul Bastien*. 1984.
- LEBEAU P. Allocution du 10 juillet 1953. *Cérémonie en l'honneur du XXVe anniversaire de l'Institut de Biologie physico-chimique. 2^e Fondation Edmond de Rothschild pour le développement de la Recherche scientifique*. Paris : Hermann et Cie, 1953.
- LEBEAU P. *Notice sur la vie et l'œuvre de Pierre Jolibois (1884-1954)*. (8 mars 1954).
- LE CHATELIER H. *Rapport secret pour l'élection de Paul Lebeau* (Académie des sciences). 1919.
- LPS, 1961-1981 : *Le Progrès scientifique*. Paris : DGRST, 1961-1981.
- LUCAS R. *Notice sur la vie et l'œuvre de Louis Hackspill*. Séance du 14 février 1966.
- MAYER A. Allocution du 10 juillet 1953. *Cérémonie en l'honneur du XXVe anniversaire de l'Institut de Biologie physico-chimique. 2^e Fondation Edmond de Rothschild pour le développement de la Recherche scientifique*. Paris : Hermann et Cie, 1953.
- MIN, 1953 : ministère de l'Industrie et de l'Énergie, *La recherche industrielle en France 1952-1953. Documentation sur les principaux organismes de recherches (1952-1953)*.
- MIN, 1956 : *Répertoire des laboratoires scientifiques*. Paris : Office national des universités et écoles françaises, 1956.
- MIN, 1966a : ministère de l'Industrie, *La recherche universitaire. Sciences exactes et naturelles. Tome III : chimie*, collection : « répertoire national des laboratoires » (1966).
- MIN, 1966b : *5^e plan de développement économique et social. Tome II : la recherche scientifique et technique*. Paris : La Documentation Française, 1966.
- MIN, 1966c : *Répertoire des scientifiques français*. Paris, 1966.
- MIN, 1974 : *Liste des laboratoires et centres de recherche des universités françaises*. Paris : La Documentation Française et DGRST, 1974.
- MIN, 1980 : *Construire l'avenir : livre blanc sur la recherche présenté au Président de la République*. Paris : La Documentation française, 1980.
- MIN 1982 : Recherche et développement technologique de la France, Orientation et programmation, loi n°82-610 du 15 juillet 1982. *Journal officiel de la République française*.

MORETTE A. *Paul Lebeau. Chimiste et Homme d'action 1868-1959*. 1959.

OCDE, 1972 : *Problèmes et perspectives de la recherche fondamentale dans les domaines multi-disciplinaires – Matériaux*. Paris : OCDE, 1972.

OCDE, 1981 : *La politique scientifique et technologique pour les années 1980*. Paris : OCDE, 1981.

OECE, 1951 : *Organisation de la recherche industrielle en France 1951*. Mission OECE-84. Paris : Association française pour l'accroissement de la productivité, 1951.

ONUUF, 1956 : Office national des universités et écoles françaises, *Répertoire des laboratoires scientifiques* (1956).

ROHMER R. Allocution du Professeur Raymond Rohmer de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg. *Jubilé scientifique du professeur André Chrétien*. Paris : Gauthier-Villars, 1973, p. 3-8.

SOLVAY, 1963 : *Cinquantenaire de l'Institut International de Chimie (1913-1963)*. (anonyme).

4. Bibliographie

Sciences physiques et chimiques.

ABRAGAM A. *De la physique avant toute chose*. Paris : Odile Jacob, 1987.

ALLPRESS J.G., SANDERS J.V., WADSLEY A.D. Multiple Phase Formation in the Binary System Nb₂O₅-WO₃. VI. Electron Microscopic Observation and Evaluation of Non-Periodic Shear Structures. *Acta Crystallographica*, 1969, B25, p. 1156-1164.

ANDERSON J. S. *Annual Report of progress in chemistry*, 1947, 43, 104.

ANDERSON J. S., EMELEUS H J. *Modern Aspects of Inorganic Chemistry*. London : Butler and Tanner, 1938, 1952, 1960.

ATKINS P.W. *Physical Chemistry*. Oxford, Melbourne, Tokyo : Oxford University Press, 1998.

BALIBAR F. *La science du cristal*. Paris : Hachette, 1991.

BARRER R. M. *Diffusion and through in solids*. Cambridge : Cambridge University Press, 1941.

BEEVERS C.A., ROSS M.A. *Z. Kristallographie*, 1937, 97, p. 59.

BÉNARD J. La structure cristalline facteur des réactions dans l'état solide. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1946, p. 511-521. (conférence, Société chimique de France, 11 janvier 1946).

BÉNARD J. Les combinaisons ioniques à composition variable. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1951, 18, p. 295-304. (conférence, section de Paris SCF, 23 juin 1950).

BÉNARD J. La chimie minérale. Sur les tendances actuelles des sciences chimiques. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1963, p.919-947. (réunion, Maison de la chimie, 13 décembre 1962).

BÉRANGER G., LACOMBE P., TRICOT R. *Le Zirconium, Matériau pour Industries Chimiques*. Les Ulis (France) : les éditions de physique, 1992.

BERNAL J. D. *Transactions of the Faraday Society*, 1938, 34, p. 834.

BLANDIN J., BRIFFAUT J.P. *Notions sur la théorie des groupes finis. Applications à la physique. Tome I : Généralités – Théorème de Wigner-Eckart*. Bellevue : Publication Ronéo CNRS, octobre 1966, 55 p.

BRAGG W.L., GOTTFRIED C., WEST J. Z. *Kristallographie*, 1931, 77, p. 255.

BRAGG W. L. The growing power of X-ray Analysis. *Fifty years of X-ray diffraction* / ed. par P. P. EWALD. Utrecht : International Union of Crystallography, 1962.

Bulletin de l'Institut du Verre. Paris : Institut du Verre, mars 1946-janvier 1947 (puis *Verres et Réfractaires*, juin 1947).

BUSH V. *Science: The Endless Frontier*. Washington DC : US Government Printing Office, 1945.

CARO P. *Structure électronique des éléments de transition. L'atome dans le cristal*. Paris : PUF, 1976.

CARO P. Les rayons X et la structure de la matière. *Lettre de l'Académie des sciences*, automne 2002, n°5, p. 6-11.

CASTRO R. Historique des aciers inoxydables. *Les aciers inoxydables* / dir. par P. LACOMBE, B. BAROUX, G. BERANGER. Les Ulis : les éditions de la physique, 1990, p. 3-9.

CEA, 1959 : *Colloque sur la diffusion de l'état solide (Symposium on solid state diffusion)* (CEN Saclay, 3-5 juillet 1958). Amsterdam : North Holland Publishing Cy, 1959.

CEA, 1963 : SÉMINAIRE DE CHIMIE DES SOLIDES (1961-1962 ; CEN Saclay). Structure et topochimie des solides minéraux. Paris : PUF, 1963.

CHAUDRON G., BÉNARD J. Préface. COLLOQUE INTERNATIONAL DU CNRS (10, 1948, Paris). *Réactions dans l'état solide*. Paris : CNRS, 1949.

Les hautes températures et leurs utilisations en physique et chimie / dir. par G. CHAUDRON, F. TROMBE. Paris : Masson, 1973.

CHEVREL R., SERGENT M., PRIGENT J. Sur de nouvelles phases sulfurés ternaires du molybdène. *Journal of Solid State Sciences*, 1971, 3, p. 515-519.

CHEVREL R., PERRIN C., PERRIN A. Hommage à Marcel Sergent. *Solid States Sciences*, 1999, t. 1, p. 461.

CHRÉTIEN A. Recherches récentes de Chimie Minérale. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1949, n°2, p. 31-37 (conférence, École Supérieure de Chimie de Mulhouse, 1948).

CHRÉTIEN A., FREUNDLICH W. Sur la formation d'un laitier au titanate par réduction sélective de l'ilménite. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1951, 233, 5, p. 413-415.

CNRS, 1949d : COLLOQUE INTERNATIONAL DU CNRS (10, 1948, Paris). *Réactions dans l'état solide*. Paris : CNRS, 1949.

CNRS, 1961 : COLLOQUE INTERNATIONAL DU CNRS (85, 1958, Montlouis). *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie*. Paris : CNRS, 1961.

CNRS, 1963 : COLLOQUE INTERNATIONAL DU CNRS (118, 1962, Orsay). *La structure des solutions solides métalliques*. Paris : CNRS, 1963.

CNRS, 1964 : COLLOQUE INTERNATIONAL DU CNRS (1963, Grenoble). *La diffraction et la diffusion des neutrons*. Paris : CNRS, 1964.

CNRS, 1965 : COLLOQUE INTERNATIONAL DU CNRS (1964, Bordeaux). *Les composés oxygénés des éléments de transition à l'état solide*. Paris : CNRS, 1965.

CNRS, 1966 : Le Four solaire de 1000 kW du CNRS à Odeillo-Font Romeu. *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics*, décembre 1966, 228, p. 1387-1414 (séance, 1^{er} mars 1966).

CNRS, 1978 : COLLOQUE INTERNATIONAL DU CNRS (1977, Paris). *Ordre et désordre dans les solides*. Paris : CNRS, 1978.

COLLONGUES R., LEPRINCE-RINGUET F. Sur un nouveau modèle de chalumeau à plasma. *Bulletin de la société chimique de France*. 1962, p. 522.

COLLONGUES R. La chimie de l'état solide. *Ann. Université et ARERS*, 1966, 4, p. 45-57.

COLLONGUES R. *Élaboration de monocristaux réfractaires à hautes températures* (images animées, Dick Carel (réalisateur)). Vanves : SFRS, 1969, 2002.

COLLONGUES R. *La non-stœchiométrie*. Paris : Masson, 1971.

COLLONGUES R. *Le solide cristallin*. Paris : PUF, 1973.

CONDAT M., KAHN O., LIVAGE J. *Chimie théorique. Concepts et problèmes*. Paris : Hermann, 1972.

DEKEYSER W., AMELINCKX S. *Les dislocations et la croissance des cristaux*. Paris : Masson, 1955, 185p.

DESCHANVRES A. Catalyse hétérogène par les semi-conducteurs. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1956, p. 732-738.

DIEBOLD R., HÉROLD A. Action des halogènes sur les composés d'insertion du graphite avec les métaux alcalins. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1961, 252, p. 1328-1329.

DI SALVO F. Synthesis of new materials: electronic and magnetic materials and artificially structured materials. *Engineering materials*, 1985, 29 octobre.

EVERETT D.H. *Thermodynamique chimique*. Paris : Dunod, 1965. (traduction René Pâris).

Fifty years of X-ray diffraction / ed. par P. P. EWALD. Utrecht : International Union of Crystallography, 1962.

FÉREY G. Les nouveaux solides poreux ou le miracle des trous. *Actualité chimique*, 2007, 304, p. I-XV.

FAIVRE R. Les écarts à la loi des proportions définies. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1953, fasc. 2, p. 141. (conférence, section de Paris).

FARADAY DISCUSSION. *Crystal Growth*. Bristol : 1949.

FLAHAUT J. Sur la préparation et la structure cristalline du sulfure d'aluminium S_3Al_2 . *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1951, 232, 2, p. 334-336.

FLAHAUT J. Sur une variété de sulfure d'aluminium stable à haute température. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1951, 232, 23, p. 2100-2102.

FLAHAUT J. Recherches récentes sur les sulfures métalliques. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1960.

FOËX M. Compte-rendu sur le « Symposium des hautes températures » d'Asilomar (1959). *Bulletin de la Société chimique de France*, 1961, p. 117-123.

FRIEDEL J. *Graine de mandarin*. Paris : O. Jacob, 1994.

GLAZUNOV A. *Métallographie. Les diagrammes d'équilibre par questions et réponses*. Edition française. Paris : Dunod, 1951.

GOODENOUGH J. *Les oxydes des métaux de transition*. Paris : Gauthier-Villars, 1973. (traduction André Casalot).

GUÉRIN H. *Le problème de la réactivité des combustibles solides*. Paris : Dunod, 1945.

HAGENMULLER P. Fifty years of solid state chemistry. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1995, t.2, série II c, p. 537-545.

HAHN, KLINGER. *Z. Anorg. Chem.*, 1949, 259.

HEDVALL J. A. *Reaktionsfähigkeit fester Stoffe*. Leipzig : Barth, 1938.

HEDVALL J. A. *Einführung in die Festkörperchemie*. Braunschweig : Fried Vieweg und Sohn, 1952, 292 p.

HYDE B. John Stuart Anderson (9 January 1908 – 25 December 1990). *Journal of Solid State Chemistry*, 1993, 5, 104, p. 1-4.

IUPAC, 1957 : CONGRES INTERNATIONAL DE CHIMIE PURE ET APPLIQUÉE (16 : 1957 : Paris).

JMA, 1949 : « Compte-rendu des Journées Métallurgiques d'Automne », *Revue de Métallurgie*, décembre 1949.

JONES R.W. *Fundamental Principles of sol-gel technology*. Londres : The Institute of Metals, 1989.

KAHN A., LEJUS A.M., MADSAC M., THÉRY J., VIVIEN D., BERNIER J.C. Preparation, structure, optical and magnetic properties of lanthanide aluminate single crystals (LnMgAl₁₁O₁₉). *Journal of Applied Physics*, 1981, 52.

KITTEL C. *Introduction to solid state physics*. London : Chapman et Hall, 1953.

FIAT review. Inorganic chemistry / ed. par W. KLEMM. Office of Military Government for Germany. Wiesbaden : Dieterich'sche Verlagsbuchhandlung, 1948.

KLEMM W. Valences anormales dans les complexes du fluor et de l'oxygène. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1956, p1325-. (conférence, Société chimique de France, 22 avril 1955).

Les aciers inoxydables / dir. par P. LACOMBE, B. BAROUX, G. BERANGER. Les Ulis : les éditions de la physique, 1990.

Fours électriques et Chimie / dir. par P. LEBEAU. Paris : PUF, 1924.

Les Hautes Températures et leurs utilisations en Chimie / dir. par P. LEBEAU. Paris : Masson et Cie, 1950.

LE CARS Y., THÉRY J., COLLONGUES R. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1972, 274, p. 4.

LE CARS Y., THÉRY J., COLLONGUES R. *Revue internationale des hautes températures et des réfractaires*, 1972, 9, p. 153.

LE CHATELIER H. *Leçons sur le carbone. La combustion. Les lois chimiques*. Paris : Librairie Scientifique J. Hermann, 1926.

L'Indépendant, 1976 : Une remarquable exposition et une très belle fête en l'honneur de M. Trombe. *L'Indépendant*, 25/10/1976 (auteur probable : A. Jover).

LIVAGE J. Vers une chimie écologique. Quand l'air et l'eau remplacent le pétrole. *Le Monde*, 26 octobre 1977, p. 20.

LIVAGE J., VIVIEN D. *Séminaire RMN – RPE en chimie du solide* (Redon, 25-29 septembre 1978).

LIVAGE J. *Verres et céramiques, de l'art du feu à la chimie douce* [Images animées]. Producteur : La mission 2000 en France, 2000. (conférence par Jacques Livage).

MATTHIAS B.T., MAREZIO M., CORENZWIT E., COOPER A.S., BARZ H.E. High temperature superconductors, the first ternary systems. *Science*, 1972, 175, p. 1465-1466.

MAZIÈRES C. *Le solide non cristallin*. Paris : PUF, 1978.

Métallurgie. Paris : Presses Documentaires, 1945, volume 1 (cours-conférences, centre de perfectionnement technique, 1^{er} cycle : janv.-fév. 1944).

MEYERS R. J. *Advances in colloid sciences*. 1942, 1.

MICHEL A. *Chimie minérale. Cours SPCN*. Paris : Hermant, non daté (estimation : 1945-1960).

- MICHEL A. Les données essentielles de la Chimie structurale. *Journées d'information de la chimie*. Paris, ENSCP, 22-27 septembre 1958, Union des physiciens, p. 17-30.
- MONDAIN-MONVAL P., PÂRIS R. Étude thermométrique de la formation des complexes minéraux. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1934, 198, p. 1154-1156.
- MONTEL G. Sur les composés d'insertion. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1955, p. 1013-1015. (mise au point).
- OLMER P. *La structure des choses*. Paris : Hachette, collection Science et Pensée, 1949.
- PALEWSKI M. Séance solennelle du 8 janvier 1965. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1965 (compte-rendu).
- PÂRIS J., MERLIN J.-C. Sur la pyrolyse de quelques composés organiques de vanadyle. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1961, p. 2241-2243.
- PÂRIS J., PÂRIS R. Obtention d'oxydes mixtes et de solutions solides par décomposition de complexes organiques mixtes. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1965, p. 1138-1141.
- PAULING L. *Chimie générale. Introduction à la chimie descriptive et à la chimie théorique moderne*. Paris : Dunod, 1951. (traduction René Pâris).
- Traité de Chimie minérale*. XII tomes / ed. par P. PASCAL. Paris : Masson, 1932-1933.
- Nouveau Traité de Chimie minérale*. XX tomes / ed. par P. PASCAL. Paris : Masson, 1956-1967.
- Modern Aspects of Solid State Chemistry* / ed. par C.N.R. RAO. New York : Plenum, 1970.
- New directions in solid state chemistry* / ed. par C.N.R. RAO et J. GOPALAKRISHNAN. Cambridge: Cambridge university press, 1986.
- REED T.B. *Journal of Applied Physics*. 1961, 32, p. 821.
- REES A. L. G. *Chemistry of the solid defect state*. London : Methuen, 1954.
- ROHMER R. La chimie des défauts du réseau. *Bulletin de la Société chimique de France*, 1955, p. 159-167. (conférence, Société chimique de France, 22 novembre 1954).
- ROUXEL J., TOURNOUX M., BREC R. *Soft Chemistry Route to New Materials*. Aedermannsdorf (Suisse) : Trans. Tech. Publications, 1994.
- ROUXEL J. Chimie des solides : une autre chimie. *L'Actualité chimique*, 1998, 3, p. 5-11. (leçon inaugurale, Collège de France, lundi 9 juin 1997).
- SCHEEL H. J. Historical Introduction. *Handbook of Crystal Growth*. Elsevier, 1993, vol. 1, p. 1-42.
- SCHOTTKY, WAGNER. *Z. physik. Chem.*, 1930, B-11, p. 167.
- SEITZ F. *Théorie moderne des solides*. Paris : Masson, 1949, 764 p. (traduction Claude Dugas)
- SOLVAY, 1956 : CONSEIL DE CHIMIE SOLVAY (10 : 1956 : Bruxelles). *Quelques problèmes de chimie minérale*. Bruxelles : R. Stoops, 1956.

SPEEDING F.H. *Journal of the American Chemical Society*. Novembre 1947.

The rare earths / ed. par F.H. SPEEDING & A.H. DAANE. New York and London : John Wiley & Sons, 1961.

SÉMINAIRE DE CHIMIE DE L'ÉTAT SOLIDE (1, 1966-1967, Paris). *Liaisons interatomiques et propriétés physiques des composés minéraux* / ed. par J.-P. Suchet. Paris : Centre de documentation universitaire et SEDES, 1968.

SÉMINAIRE DE CHIMIE DE L'ÉTAT SOLIDE (2, 1967-1968, Paris). *Croissance de composés minéraux monocristallins* / ed. par J.-P. Suchet. Paris : Centre de documentation universitaire et SEDES, 1969.

SÉMINAIRE DE CHIMIE DE L'ÉTAT SOLIDE (6, 1971-1972, Paris). *Diagrammes de phases et stœchiométrie* / ed. par J.-P. Suchet. Paris : Centre de documentation universitaire et SEDES, 1973.

TAB, 1909-1947 : *Tables de constantes et de données numériques de chimie, de physique, de biologie et de technologie*. Paris : Conseil international d'unions scientifiques et Union internationale de chimie, 1909-1947.

TRIDOT G. Sur le peruranate d'uranyle. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1951, 232, 12, p. 1215-1216.

TROMBE F. Propriétés et Utilisation des métaux des terres rares et de leurs composés. *Cours-conférence du Centre de perfectionnement technique à la Maison de la Chimie*, n°469, 1941.

TROMBE F., FOËX M., WYART J. Propriétés de la zircone fondue au four solaire. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1951, 233, 2, p. 172-173.

TROMBE F. Allocution. COLLOQUE INTERNATIONAL DU CNRS (85, 1958, Montlouis). *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie*. Paris : CNRS, 1961.

TROMBE F. Les nouvelles installations de recherche du laboratoire de l'énergie solaire de Montlouis (Pyrénées-Orientales). *Bulletin de Société chimique de France*, 1961, p. 123-127.

URBAIN G., WEISS P., TROMBE F. Un nouveau métal ferromagnétique : le gadolinium. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1935, 200, p. 2132.

WEBER N., KUMMER J.T. Sodium-Sulfur Secondary batteries. *Proceedings of the 21st Annual. Power Sources Conference*, 1967, 21, p. 37-39.

WELLS A.F. *Structural inorganic chemistry*. Oxford : The Clarendon press, 1945.

WYART J. The new Crystallography in France. *Fifty years of X-ray diffraction* / ed. par P.P. EWALD. Utrecht : International Union of Crystallography, 1962.

YAO Y.F.Y, KUMMER J.T. Ion Exchange properties of and rates of ionic diffusion in Beta-Alumina. *Journal of Inorganic Nuclear Chemistry*, 1967, 29, p. 2453-2475.

Sciences humaines et sociales.

- AEBISCHER V., OBERLÉ D. *Le groupe en psychologie sociale*. 2^e édition. Paris : Dunod, 1998.
- BECKER J.-J. *Histoire politique de la France depuis 1945*. Paris : Armand Colin, 1988.
- BELLON A. Changer de président ou changer de Constitution. *Le Monde diplomatique*, mars 2007, n°636, p. 24-25.
- BERSTEIN S., MILZA P. *Histoire de la France au XX^e siècle. 1958-1974*. Paris : Éditions Complexe, 1999.
- BLOCH M. *L'étrange défaite. Témoignage écrit en 1940*. Paris : Gallimard, folio histoire, 1990.
- BLOCH M. *Apologie pour l'histoire ou Métier d'historien*. deuxième édition. Paris : Armand Colin, 2002.
- CARSALADE Y. *Les grandes étapes de l'histoire économique*. Paris : ellipses, 1998.
- Les Matériaux nouveaux : dynamique économique et stratégie européenne* / dir. par P. COHENDET, M.-J. LEDOUX, E. ZUSCOVITCH. Paris : Économica, 1987.
- GINZBURG C. *Les batailles nocturnes. Sorcellerie et rituels agraires aux XVI^e et XVII^e siècles*. Paris : Flammarion, 1999.
- GINZBURG C. *Le fromage et les vers : l'univers d'un meunier du XVI^e siècle*. Paris : Flammarion, 1980.
- GIRARDET R. *Mythes et mythologies politiques*. Paris : Seuil, 1986, 210 p.
- LE GOFF J. *Histoire et mémoire*. 5^e édition (1977). Paris : Gallimard, 1988.
- LEVI P. *Si c'est un homme*. (1958). Paris : Julliard, 1987.
- MABILEAU A. *Jacques Chaban-Delmas à Bordeaux*. Paris : Pedone, 1973.
- MEILLASSOUX Claude. *Mythes et limites de l'anthropologie. Le Sang et les Mots*. Lausanne : Éditions Page deux, 2001.
- POUTIGNAT P., STREIFF-FENART J. *Théories de l'ethnicité*. Paris : PUF, 1995.
- RICOEUR P. *La mémoire, l'histoire, l'oubli*. Paris : Seuil, 2000.
- THÉBAUD-MONY A. Le travail, lieu de violence et de mort. *Le Monde diplomatique*, juillet 2007, p. 6-7.
- WEBER M. *Economy and Society*. Berkeley : University of California Press, 1978.

Histoire et sociologie des sciences et des techniques.

ABBOT A. Things of Boundaries. *Social Research*, 1995, vol. 62, N°4, p. 857-882.

La mise en mémoire de la science. Pour une ethnographie historique des rites commémoratifs / dir. par P. G. ABIR-AM. Amsterdam : éditions des archives contemporaines, 1998.

Commemorative Practices in Science. Historical Perspectives on the Politics of Collective Memory / ed. par P. G. ABIR-AM, C. A. ELLIOTT. *Osiris*, 1999, 14.

ALLAMEL-RAFFIN C. *La production et la fonction des images en physique des matériaux et astrophysique*. Th. : épistémologie, histoire des sciences et des techniques : Strasbourg I : 2004, 480 p.

ASHBY M. The science of Engineering Materials. *Science and Future Choice* / ed. par P.W. HEMILY et M.N. OZAAS. Oxford : Clarendon Press, 1979, vol. I.

ASHBY M. F. Technology in the 1990s: advanced materials and predictive design. *Phil. Trans.*, 1987, A322, p. 393-403.

Histoire, Recherche, Télécommunication. Des recherches au CNET. 1940-1965 / dir. par M. ATTEN. Paris : CNET, Réseaux, 1996.

BENSAUDE-VINCENT B., STENGERS I. *Histoire de la chimie*. Paris : La Découverte, 1992.

BENSAUDE-VINCENT B. The Construction of a discipline : Materials Science in the USA. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 2001, 31, part 2, p. 223-248.

BENSAUDE-VINCENT B. The New Science of Materials: A Composite Field of Research. *Chemical Sciences in the 20th Century Bridging Boundaries* / ed. par C. Reinhardt. New York : Wiley-VCH, 2001, p. 258-270.

BENSAUDE-VINCENT B., HESSENBRUCH A. Materials Science : A field about to explode ? *Nature Materials*, 2004, 3, N°6, p. 345-346.

BENSAUDE-VINCENT B., TEISSIER P. Robert Collongues. *New Dictionary of Scientific Biography*. 2007. (à paraître).

BERNARD M. Le CNET et les semi-conducteurs, du début des années 1950 au milieu des années 1960. *Histoire, Recherche, Télécommunication. Des recherches au CNET. 1940-1965* / dir. par ATTEN M. Paris : CNET, Réseaux, 1996.

BERNIER J.-C. André Michel. *Dictionnaire bibliographique de la Société chimique de France*. Paris : 2007 (à paraître).

BIDAULT G. *Les mémoires de recherche*. Paris : CNRS, Cahiers pour l'histoire de la recherche, 1993.

BOUDIA S. *Marie Curie et son laboratoire ; Science et industrie de la radioactivité en France*. Paris : éditions des Archives contemporaines, 2001.

'Writing the History' of the Physical Sciences after 1945: state of the art, questions and perspectives / dir. par S. BOUDIA, D. PESTRE, S. SOUBIRAN. Strasbourg, 7-9 juin 2007 (préparation au workshop).

BOURDIEU P. *Homo Academicus*. Paris : Les Éditions de Minuit, 1984.

BOURDIEU P. *Science de la science et réflexivité*. Paris : Raisons d'agir, 2001.

La chimie dans la société. Son rôle, son image / ed. par G. BRAM, F. CHAMOZZI, A. FUCHS, A. GRELON, C. LANCIANO-MORANDAT, L. MORDENTI. Paris : L'Harmattan, 1995.

Instruments and Experimentation in the History of Chemistry / ed. par J. BUCHWALD, F. L. HOLMES, T. LEVERE. Boston : MIT Press, 1998.

Instruments of Science. An Historical Encyclopedia / ed. par R. BUD, D. J. WARNER. London : The Science Museum ; New-York : The National Museum of American History, 1998.

CAHN R. W. *The Coming of Materials Science*. Londres : Pergamon, 2001, 569 p.

CALLON M., LAW J., RIP A. *Mapping the Dynamics of Science and Technology*. Londres : Macmillan, 1986.

CALLON M., LASCOUMES P., BARTHE Y. *Agir dans un monde incertain : essai sur la démocratie technique*. Paris : Éditions du Seuil, 2001.

CHARLE C., TELKES E. *Les professeurs du Collège de France. Dictionnaire biographique 1901-1939*. Paris : éditions du CNRS, 1988.

CHARLE C., TELKES E. *Les professeurs de la Faculté des sciences de Paris. Dictionnaire biographique 1901-1939*. Paris : éditions du CNRS, 1989.

CHARLE C. *La République des universitaires (1870-1940)*. Paris : éditions du Seuil, 1994.

CHARPENTIER-MORIZE M. La contribution des « Laboratoires Propres » du CNRS à la recherche chimique en France de 1939 à 1973. *Cahiers pour l'histoire du CNRS*, 1989, 4, p. 79-112.

CHEVALLEY C. La connaissance a-t-elle un sujet ? Un essai pour repenser l'individu. *Revue européenne des sciences sociales*, 2002, Tome XL, n°124, p. 7-26.

CHEZEAU N. *De la forge au laboratoire. Naissance de la métallurgie physique (1860-1914)*. Rennes : Presses Universitaires de Rennes, 2004, 237 p.

CLARO-GOMÈS J. M. *Georges Urbain (1872-1938). Chimie et philosophie*. Th. : Histoire et philosophie des sciences : Paris X : 2003, 190 p.

CORNET M. Histoire du centre d'études de chimie métallurgique. *Cahiers pour l'histoire du CNRS*, 1990, 5, p. 59-109. (http://www.cecm.cnrs.fr/Bibliocecm/historique_cecm.html).

[CRANE-HERVÉ D. La diffusion des innovations scientifiques. *Revue française de sociologie*, 1969, 10, p. 166-185.](#)

Les sciences pour la guerre. 1940-1960 / dir. par A. DAHAN, D. PESTRE. Paris : Editions EHESS, 2004.

DAHL P. F. *Superconductivity: its historical roots and development from mercury to the Ceramic Oxides*. New York : American Institute of Physics, 1992.

DAUMAS M. *Histoire générale des techniques*. Paris : PUF, 1966-1979.

DE BÉCHILLON D. Transdisciplinarité. *La revue du M.A.U.S.S. semestrielle*, n°10, 2^e semestre 1997, p. 185-200.

DEFrance C. La mission du CNRS en Allemagne (1945-1950), entre exploitation et contrôle du potentiel scientifique allemand. *La revue pour l'histoire du CNRS*, 2001, 5, p. 54-65.

DEMANÉE M. Histoire de l'organisation de la recherche au CNRS. *Cahiers pour l'histoire du CNRS*. Paris : éditions CNRS, 1989.

DERÉ A.-C. Maurice Javallier et Gabriel Bertrand : deux chimistes pastoriens dans l'institut de guerre. *Le sabre et l'éprouvette. L'invention d'une science de guerre (1914-1939)*. Paris : Éditions Noesis, 2003, p. 74-87.

DOEL R. E., HENSON P. M. Reading photographs: photographs as evidence in writing the history of modern science. *The historiography of contemporary science and technology* / ed. par T. SÖDERQVIST. Amsterdam : Harwood Academic Publishers, 1997, p. 201-236.

DRUESNE G. *Le Centre National de la Recherche Scientifique*. Paris : Masson, 1975.

Histoire de l'université de Nantes : 1460-1993 / dir. par G. EMPTOZ. Rennes : Presses universitaires de Rennes, 2002.

Universities and the Global Knowledge Economy. A Triple Helix of University-Industry-Government Relations / ed. par H. ETZKOWITZ, L. LEYDERSDOFF. Londres : Pinter, 1997.

A Triple Helix of University-Industry-Government Relations: The future Location of Research? / ed. par H. ETZKOWITZ, L. LEYDERSDOFF. New York : Science Policy Institute, 1998.

EVrARD V. *Paul Lebeau, un élève de Moissan*. Th. : Pharmacie : Paris V, 1988.

FontANON C., GRELON A. *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers : dictionnaire biographique, 1794-1955*. Paris : CNAM, 1994.

GALISON P. *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*. Chicago : The University of Chicago Press, 1997.

GEISON G. Scientific Change, Emerging Specialties, and Research Schools. *History of Science*, 1981, p. 20-40.

Research Schools : Historical Reappraisals / ed. par G. GEISON, F. L. HOLMES. *Osiris*, 1993, 8.

GÉRAUD M.-O., LESERVOISIER O., POTTIER R. *Les notions clés de l'ethnologie*. Paris : Armand Colin, HER, 2001.

GIBBONS M., LIMOGES C., NOWOTNY H., SCHWARTZMAN S., SCOTT P., TROW M. *The New Production of Knowledge. The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*. London : Sage, 1994.

GIERYN T. *Cultural Boundaries of Science: Credibility on the Line*. Chicago : Chicago University Press, 1999.

Histoire des techniques : technique et civilisations, technique et sciences / dir. par B. GILLE. Paris : Gallimard, 1993.

Dictionary of Scientific Biography / ed. par C.-C. GILLISPIE. US : Charles Scribner's and Sons, 1981.

GINGRAS Y. *Physics and the Rise of Scientific Research in Canada*. Montréal-Kingston : Buffalo, 1991.

Functions and uses of disciplinary histories / ed. par L. GRAHAM, W. LEPENIES, P. WEINGART. Dordrecht/Boston/Lancaster : D. Reidel Publishing Company, 1983. (collection Sociology of Sciences, a Yearbook, n°7).

GUTHLEBEN D. Coup de soleil au CNRS... la genèse du PIRDES. *La Revue pour l'histoire du CNRS*, 2007, n°17, p. 36-39.

HAGSTROM W. O. *The scientific community*. New York : Basic books, 1965.

HEMILY P.W., OZAAS M.N. *Science and Future Choice*, vol. I. Oxford : Clarendon Press, 1979.

HENNIG J. Heterogeneity in Scanning Tunneling Microscopic Practice. *'Writing the History' of the Physical Sciences after 1945: state of the art, questions and perspectives* / dir. par S. BOUDIA, D. PESTRE, S. SOUBIRAN. Strasbourg, 7-9 juin 2007.

HERMANN A., KRIGE J., MERSITS U., PESTRE D. *History of CERN*. Vol. 1, *Launching the European Organization for Nuclear Research*. Amsterdam : North Holland, 1987.

HODDESON L. The roots of solid-state research at Bell Labs. *Physics Today*, 1977, mars, p. 61-67.

HODDESON L. Solid State Science. *Science in the Twentieth Century* / ed. par J. KRIGE, D. PESTRE. Amsterdam : Harwood Academic Publishers, 1997, p. 585-598.

HODDESON L. The conflict of memories and documents: dilemmas and pragmatic of oral history. *The historiography of contemporary science and technology* / ed. par T. SÖDERQVIST. Amsterdam : Harwood Academic Publishers, 1997, p. 187-200.

Out of the Crystal Maze. Chapters from the History of Solid State Physics / ed. par L. HODDESON, E. BRAUN, J. TEICHMAN, S. WEART. Oxford : Oxford University Press, 1992.

The Chemical Industry in Europe, 1850-1914: Industrial Growth, Pollution, and Professionalization / ed. par E. HOMBURG, A. S. TRAVIS, H. G. SCHRÖTER. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Press, 1998.

JACQ F. *Pratiques scientifiques, formes d'organisation et représentations politiques de la science dans la France de l'après-guerre. La « politique de la science » comme énoncé collectif (1944-1962)*. Th. : ENSM : Paris : 1996.

JACQ F., PESTRE D. Une recomposition de la recherche académique et industrielle en France dans l'après-guerre, 1945-1970, Nouvelles pratiques, formes d'organisation et conceptions politiques. *Sociologie du travail*, 1996, 3, p. 263-277.

JACQ F. Quel devenir pour les systèmes de recherche issus de la Seconde Guerre mondiale et de la guerre froide ? *Que sont devenus les politiques publiques. Réalités industrielles*. Paris : École des Mines, 1998.

Instrumentation Between Science, State and Industry / ed. par B. JOERGES, T. SHINN. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001.

KEITH S.T., HOCH P.K. Formation of a research school. Theoretical solid state physics at Bristol, 1930-1954. *British Journal for the History of Sciences*, 1986, 19, p. 19-44.

KENDALL B. Industrial Research Laboratories. *The Sciences in the American Context: New Perspectives* / ed. par N. Reingold. Washington DC : Smithsonian Institution Press, 1979, p. 193-208.

KNORR-CETINA K. *The manufacture of knowledge. An essay on Constructivist and Contextual Nature of Science*. Oxford : Pergamon Press, 1991.

Science in the Twentieth Century / ed. par J. KRIGE, D. PESTRE. Amsterdam : Harwood Academic Publishers, 1997.

KRIGE J. The Politics of European Scientific Collaboration. *Science in the Twentieth Century* / ed. par J. KRIGE, D. PESTRE. Amsterdam : Harwood Academic Publishers, 1997, p. 897-918.

KUHN T. *The structure of scientific revolutions*. Chicago : The University of Chicago Press, 1962, 1970, 1996.

LACHAUX P., DELHOMME P. *La guerre des gaz (1915-1918)*. Paris : Hélide, 1985.

LANCIANO-MORANDAT C. *Le Mode de structuration du département des "sciences chimiques" du CNRS*. Aix-en-Provence : CNRS, 1999.

LAKATOS I. *The methodology of scientific research programmes* [1978]. Cambridge : Cambridge University Press, 1980.

Le général de Gaulle et la recherche scientifique et technique / dir. par A. LARCAN, J. PERGET. (conférences 2001-2003, Maison de la Chimie, Paris). Paris : Fondation Charles de Gaulle, 2003, Cahier n°12.

LAREDO P. Technological Programs in the European Union. *Universities and the Global Knowledge Economy. A Triple Helix of University-Industry-Government Relations* / ed. par H. ETZKOWITZ, L. LEYDERSDOFF. Londres : Pinter, 1997, p. 33-46.

LATOUR B. Les « Vues » de l'Esprit. *Culture technique* / dir. par B. LATOUR, J. DE NOBLET, 1985, 14, p. 4-30.

LATOUR B., WOOLGAR S. *La vie de laboratoire. La production des faits scientifiques*. Paris : La découverte, 1988.

LATOUR B. *La Science en action*. Paris : La Découverte, 1989.

LEICESTER H. M. Henry Le Chatelier. *Dictionary of Scientific Biography* / ed. par C.-C. GILLISPIE. US : Charles Scribner's and Sons, 1981.

LEMAINE G., MATALON B., PROVENSAL B. La lutte pour la vie dans la communauté scientifique. *Revue française de sociologie*, 1969, 10, p. 139-165.

LE MOIGNE J.-L. L'arbre ou l'archipel ? sur la connaissance disciplinée. *La revue du M.A.U.S.S. semestrielle*, 1997, n°10, 2^e semestre, p. 167-184.

LE ROUX M. *L'entreprise et la recherche : un siècle de recherche industrielle à Péchiney*. Paris : Rive droite, 1998.

LE ROUX M., WALSH V. Un découvreur de médicaments et ses archives, Pierre Potier chercheur à l'ICSN (1960-2005). *Les archives de l'invention, Écrits, Objets, et Images de l'activité inventive des origines à nos jours* / ed. par L. HILAIRE-PEREZ, M.-S. CORCY. Toulouse : éditions CNRS, Histoire & Technique, 2006, p. 291-311.

LETTÉ M. *Henry Le Chatelier (1850-1936) et la constitution d'une science industrielle*. Th. : Histoire des sciences : Paris, EHESS : 1998.

LETTÉ M. *Henry Le Chatelier (1850-1936) ou la science appliquée à l'industrie*. Rennes : Presses Universitaires de Rennes, 2004.

LICOPPE C. Les premières années de recherches sur les semi-conducteurs et les 'transistrons' au CNET (1946-1956). *Histoire, Recherche, Télécommunication. Des recherches au CNET. 1940-1965* / dir. par M. ATTEN. Paris : CNET, Réseaux, 1996, p. 125-145.

LUDMANN-OBIER M.-F. La mission du CNRS en Allemagne (1945-1950). *Cahiers pour l'histoire du CNRS*, 1989, 3, Paris : éditions CNRS, p. 73-84.

LURÇAT F. Pour une épistémologie négative. Disciplines et frontières. *La revue du M.A.U.S.S. semestrielle*, 1997, n°10, 2^e semestre, p. 155-166.

MATRICON J., WAYSAND G. *La guerre du froid. Une histoire de la supraconductivité*. Paris : Seuil, 1994.

MERTON R. K. The Matthew Effect in Science. *The Sociology of Science*, 1968, p. 439-459.

MORIN E. Sur la transdisciplinarité. *La revue du M.A.U.S.S. semestrielle*, 1997, n°10, 2^e semestre, p. 21-29.

From Classical to Modern Chemistry. The Instrumental Revolution / ed. par P. MORRIS. London : Royal Society of Chemistry, 2002.

N'DIAYE P. Les ingénieurs oubliés de la bombe. *La recherche*, 1998, 306, p.82-87.

N'DIAYE P. *Du nylon et des bombes. Du Pont de Nemours, le marché et l'État américain. 1900-1970*. Paris : Belin, 2001.

NOWOTNY H., SCOTT P., GIBBONS M. *Re-thinking Science, Knowledge and the Public in an Age of Uncertainty*. Cambridge : Polity, 2002 (traduction française, 2003).

NYE M.-J. National Styles ? French and English Chemistry in the Nineteenth and Early Twentieth Centuries. *Osiris*, 1993, vol. 8, p. 30-49.

NYE M.-J. *From Chemical Philosophy to Theoretical Chemistry. Dynamics of Matter and Dynamics of disciplines*. Los Angeles : University of California Press, 1993.

PESTRE D. *Physique et physiciens en France 1918-1940*. Paris : éditions des archives contemporaines, 1984.

PESTRE D. Louis Néel, le magnétisme et Grenoble. Récit de la création d'un empire physicien dans la province française 1940-1965. *Cahiers pour l'histoire du CNRS*, 1990, 8, Paris : éditions CNRS, 188 p.

PESTRE D. *Science, argent et politique. Un essai d'interprétation*. Paris : INRA éditions, 2003.

PESTRE D. Sciences physiques et recherche industrielle et militaire en France : un changement historique de régime. *Les sciences pour la guerre. 1940-1960* / dir. par A. DAHAN, D. PESTRE. Paris : Éditions EHESS, 2004, p. 317-341.

PICARD J-F. *La République des savants : La recherche française et le CNRS*. Paris : Flammarion, 1990.

PIGANIOL P. L'exemple de la DGRST. *Le général de Gaulle et la recherche scientifique et technique* / dir. par A. LARCAN, J. PERGET. (conférences 2001-2003, Maison de la Chimie, Paris). Paris : Fondation Charles de Gaulle, 2003, p. 117-142.

PROST A. Les origines de la politique de la recherche en France (1939-1958). *Cahiers pour l'histoire du CNRS*, 1988, 1, p. 41-62.

PROST A. Les réformes du CNRS (1959-1966). *Cahiers pour l'histoire du CNRS*, 1990, 9, p. 7-38.

RAMUNNI G. (commentaires). La réorganisation du CNRS, 7 septembre 1944. *La revue pour l'histoire du CNRS*, 2000, n°3, p. 60-70.

Chemical Sciences in the 20th century . Bridging Boundaries / ed. par C. REINHARDT. Wiley VCH, 2001.

REINHARDT C. *Shifting and rearranging : physical methods and the transformation of modern chemistry*. Sagamore Beach, MA (USA) : Science History Publications, 2006.

RENAUT A. *Les révolutions de l'université. Essai sur la modernisation de la culture*. Paris : Calmann-Levy, 1995.

RINGER F. K. *The decline of the German mandarins. The German Academic Community, 1890-1933*. Cambridge (Massachusetts), Harvard University Press, 1969.

SHINN T. The Bellevue grand électroaimant, 1900-1940: birth of a research-technology community. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 1993, 24, p. 157-187.

SHINN T. Crossing Boundaries: The Emergence of Research-Technology Communities. *Universities and the Global Knowledge Economy. A Triple Helix of University-Industry-Government Relations* / ed. par H. ETZKOWITZ, L. LEYDERSDOFF. Londres : Pinter, 1997.

SHINN T. New sources of radical innovation: research-technologies, transversality and distributed learning in a post-industrial order. *Social Science Information*, 2005, 44, n°4, p. 731-764.

SHINN T., RAGOUET P. *Controverses sur la science. Pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique*. Paris : éditions Raisons d'agir, 2005.

The historiography of contemporary science and technology / ed. par T. SÖDERQVIST. Amsterdam : Harwood Academic Publishers, 1997.

STAR S., GRIESEMER J. Institutional Ecology, Translations, and Boundary Objects. *Social Studies of Science*, vol. 19, 1989, p. 387-420.

SUTTON L., DAVIES M. *The history of the Faraday Society*. Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 1996.

TEISSIER P. *L'émergence de la chimie du solide en France au travers du laboratoire Collongues (1950-2000)*. DEA : histoire des sciences : Paris 7 : 2004.

TEISSIER P. Le laboratoire de Robert Collongues (1950-2000). Une école de recherche aux débuts de la chimie du solide. *L'Actualité Chimique*, février 2006, n°294, p.50-59.

TEISSIER P. Jacques Bénard. *Dictionnaire bibliographique de la Société française de chimie*. Paris : SFC, 2007. (à paraître).

TEISSIER P. Paul Hagenmuller, portrait controversé d'un personnage central de la chimie du solide. *L'Actualité Chimique*, 2008 (à paraître).

Instruments / ed. par A. VAN HELDEN, L.T. HANKINS. *Osiris*, 1994, 9.

VOILLEQUIN B. *L'Institut de Recherches sur la Catalyse (1960-2001). Contribution à une histoire de la catalyse en France*. DEA : Histoire et philosophie des sciences : Paris X : 2005.

WALKER M. Twentieth-Century German Science. Institutional Innovation and Adaptation. *Science in the Twentieth Century* / ed. par J. KRIGE, D. PESTRE. Amsterdam : Harwood Academic Publishers, 1997, p. 795-819.

WEART S. The solid community. *Out of the Crystal Maze. Chapters from the History of Solid State Physics* / ed. par L. HODDESON, E. BRAUN, J. TEICHMAN, S. WEART. Oxford : Oxford University Press, 1992, p. 617-669.

WEBSTER A., PACKER K. When Worlds Collide: Patents in Public-Sector Research. *Universities and the Global Knowledge Economy. A Triple Helix of University-Industry-Government Relations* / ed. par H. ETZKOWITZ, L. LEYDERSDOFF. Londres : Pinter, 1997, p. 49-61.

WEST D. R. F., HARRIS J. E. *Metals and the Royal Society*. Cambridge : The University Press, 1999, 787 p.

L'émergence de la chimie du solide en France (1950-2000). De la formation d'une communauté à sa dispersion.

Pierre TEISSIER.

RÉSUMÉ

Comment émerge une discipline scientifique centrée sur un état de la matière, le solide ? Cette thèse décrit la formation et le devenir d'une communauté scientifique en France dans la deuxième moitié du XX^e siècle. En 1950, le solide relève de plusieurs disciplines – physique, métallurgie, cristallographie, chimie – et concerne plusieurs industries – verres, céramiques, métaux. En chimie minérale, la chimie de l'état solide cherche à embrasser tous les solides, de l'organique au minéral, de la surface au volume. Avec l'essor de la recherche publique des années 1950 et 1960, et la demande industrielle en matériaux, de plus en plus de minéralistes se focalisent sur le cristal minéral en volume. Deux axes cimentent la communauté de chimie du solide : un récit oral partagé qui fonctionne comme mythe fondateur et une pratique commune impliquant les hautes températures, la diffraction des rayons X et la relation structure-propriétés. À la fin de la décennie 1970, la chimie minérale disparaît ; la chimie du solide forme une institution à l'identité disciplinaire forte malgré des disparités locales et familiales. Sur la troisième période, de 1980 à 2000, les solidistes s'ouvrent à d'autres courants : synthèse à basse température, mise en forme, solides exotiques, modélisation. L'identité communautaire s'efface devant la multiplication des référents individuels et se disperse suivant une chimie des solides plurielle. La chimie du solide française est-elle spécifique en Europe ? La France et l'Allemagne ont œuvré à la construction d'une communauté européenne, qui, par son organisation, se distingue du modèle américain, focalisé sur la science des matériaux et l'interdisciplinarité.

Discipline : Épistémologie, Histoire des sciences et des techniques

Mots-clés : discipline universitaire, matériaux, industrie, instruments, haute température, CNRS, communauté scientifique, structure de la matière, histoire orale, mythe et identité.

The emergence of Solid State Chemistry in France (1950-2000). From the formation to the dispersion of a community.

ABSTRACT

How did a scientific discipline focused on the solid state of matter emerge ? This dissertation describes the formation and the evolution of a scientific community in France in the second half of the twentieth century through three periods. In 1950, the solid was studied by a variety of disciplines ranging from physics to metallurgy, crystallography and chemistry, and concerned various industrial sectors – glass, ceramics, metals. Within inorganic chemistry, the chemistry of solid state aimed at studying all kind of solids, organic and inorganic, from surfaces to bulk. In the 1950's and 1960's, whereas public research and industrial demand for new materials increased, more and more inorganic chemists converged towards the mineral crystal in bulk. The chemistry of solid community cemented around two major points : an oral historical narrative shared as a founder myth and a common practice based on high temperature synthesis, X-ray diffraction and the structure/properties relationships. By the end of the 1970's, although the chemistry of solid was established as an institution with fierce identity, many local and familial dissimilarities remained. During the 1980's and 1990's, the community opened to new trends: low-temperature syntheses, processes, exotic solids, modelisation. The solidist identity faded with the multiplication of individual references and dispersed between a plurality of chemistry of solids. Finally does the French solid state chemistry exemplify a specific case in Europe? France and Germany contributed to the construction of a European community, whose organization is distinct from the American model focused of Materials science and interdisciplinarity.

Discipline : Epistemology, History of sciences and technologies

Keywords : academic discipline, Materials, industry, instruments, high temperature, Centre National de la Recherche Scientifique, scientific community, structure of matter, oral history, myth and identity.