



GROUPE BPCE

Coopératifs, banquiers et assureurs autrement.

UNIVERSITÉ PARIS NANTERRE

ÉCOLE DOCTORALE ÉCONOMIE, ORGANISATIONS, SOCIÉTÉ

LABORATOIRE ECONOMIX – UMR CNRS 7235

U.F.R. SEGMI

THESE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES ECONOMIQUES

Présentée par

Déborah LEBoulenger

Sous la direction de Valérie Mignon, Professeur à l'Université Paris Nanterre et l'encadrement de Emmanuel Hache, Professeur à l'IFP School

Essais sur la transition énergétique : enjeux, valorisation, financement et risques

Thèse soutenue publiquement à l'Université Paris Nanterre

Le 6 juillet 2017

Devant le jury composé de :

Madame Patricia CRIFO

Professeur à l'Université Paris Nanterre

Présidente du jury

Monsieur Patrice GEOFFRON

Professeur à l'Université Paris Dauphine

Rapporteur

Monsieur Emmanuel HACHE

Professeur, IFP School

Promoteur IFPEN

Madame Valérie MIGNON

Professeur à l'Université Paris Nanterre

Directrice de thèse

Monsieur Benoît SEVI

Professeur à l'Université de Nantes

Rapporteur

Monsieur Alain TOURDJMAN

Directeur des Etudes, Veille et Prospective,
BPCE SA

Examineur

UNIVERSITÉ PARIS NANTERRE
ÉCOLE DOCTORALE ÉCONOMIE, ORGANISATIONS, SOCIÉTÉ
LABORATOIRE ECONOMIX – UMR CNRS 7235
U.F.R. SEGMI

THESE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES ECONOMIQUES

Présentée par

Déborah LEBOULLENGER

Sous la direction de Valérie Mignon, Professeur à l'Université Paris Nanterre et
l'encadrement de Emmanuel Hache, Professeur à l'IFP School

Essais sur la transition énergétique : enjeux, valorisation, financement et risques

Thèse soutenue publiquement à l'Université Paris Nanterre

Le 6 juillet 2017



L'Université Paris Nanterre, IFP Energies Nouvelles et le groupe BPCE S.A n'entendent donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs et encadrants de thèse Valérie Mignon et Emmanuel Hache qui forment ensemble une équipe rêvée pour un doctorant. Vos conseils, votre écoute, votre dynamisme et votre réactivité ont été une force vitale pour la réussite de cette thèse. Je pense que je ne mesure toujours pas entièrement la chance que j'ai eu de vous avoir à mes côtés dans les moments de doute profond comme dans les moments les plus vitaminés. Pour cela et pour votre humanisme et votre dévouement je vous remercie encore du fond du cœur. Je remercie également très sincèrement les membres de mon jury, Me Patricia Crifo, M. Patrice Geoffron, M. Benoît Sévi, et M. Alain Tourdjman qui ont accepté d'évaluer et donner leur opinion d'experts sur mon travail.

Je dois beaucoup à mes partenaires de recherche, Frédéric Lantz, Catherine Baumont et Masha Pautrel qui m'ont intégré au projet de recherche Energie et Territoires dont est issu le second chapitre de cette thèse. Frédéric Lantz m'accompagne et me suit depuis mon master EDDEE à l'IFP School et c'est en grande partie à lui que je dois l'issue heureuse de mon parcours universitaire et la transdisciplinarité que j'ai tenté de donner à mes travaux de recherches. C'est une personne aux qualités humaines indéniables et avec qui c'est un réel plaisir de travailler.

Je tiens ensuite à remercier les acteurs centraux de mon intégration dans le groupe BPCE : Marguerite Bérard Andrieu, directeur général Finances Groupe, Stratégie, Juridique et Secrétariat du Conseil de Surveillance, pour avoir cru en moi et en mon projet et pour l'avoir défendu au moment décisif. J'adresse une reconnaissance appuyée à Alain Tourdjman qui fut mon interlocuteur privilégié au sein de BPCE SA et sans qui toute cette aventure n'aurait jamais eu lieu. Mes manières de réfléchir, de travailler et de sans cesse rechercher de nouvelles façons de questionner le monde qui m'entoure, sont nées de ces quatre années charnières et formatrices aux côtés de M. Tourdjman et de son équipe. Mes profonds sentiments vont à mes collègues et collaborateurs de la Direction des Etudes Veille et Prospective, Yann, Loïc, Auguste, Éric, Mathieu, avec qui cela a été un réel plaisir d'échanger sur divers sujets, qu'ils soient liés à mes recherches ou à nos centres d'intérêts communs, dépassant fort heureusement les frontières de la sphère professionnelle. J'éprouve une reconnaissance toute particulière aux amitiés qui sont nées de ces échanges à Marielle, Thomas LD, Julien L, Jacques et à celles qui ont rythmé ma première année au sein de la communauté des apprentis de BPCE : Yacine, Thomas G, Alexandre, Benoit, Mathilde et Mathieu B. Je remercie également les collaborateurs de BPCE-SA du Développement Durable, du Logement Social et des Risques, qui ont pu faire vivre mes travaux et leur trouver une

application au sein de l'entreprise, ce qui est une chance rare pour un doctorant mais tellement précieuse lorsque l'on travaille sur des sujets dont la mise en œuvre vous tient à cœur : Delphine, Fabienne, Laetitia, Guillaume, Arnaud, Jean-Baptiste, Bruno...

BPCE est aussi une aventure humaine et sportive, j'en profite pour remercier toute l'équipe de basket de l'association sportive de BPCE qui me soutient depuis mes débuts: Coach JB, Vas, Rudy, Arno, Benjamin, Arnaud, Lucie-Anne, Mayo, Jean-Philippe, Yohan, Jackson, Thierry, Erwan, Yoan.... Merci de m'avoir permis d'exulter mes frustrations et mon stress en maints coups de coudes et de griffes sur le terrain.

Je remercie également mes collègues mais surtout amis doctorants et chercheurs, membres du laboratoire EconomiX, de l'IFPEN ou encore de la FAEE, ceux rencontrés en séminaires, conférences, et autre workshops : Audrey, Charlotte, Lesly, Lauren, Clara, Ekaterina, Victor, Romain, Cyril, Antoine, Anthony, Nicolas, Simon, Stellio, Zouhair, Gilles, Ahmed, Florian, Quentin, P.H ... Il n'y a rien de tel que les moments d'insouciance passés avec ceux qui partagent les mêmes soucis que vous.

Je remercie mes amis fidèles qui sont su m'accompagner dans mes bons et mes mauvais jours de doctorante et ont su quand il fallait arrêter de me demander si j'avais bientôt terminé ma thèse (on reconnaît les plus compréhensifs à ceux qui trouvent qu'aboutir une thèse en trois ans relève de l'épreuve du sprint plutôt que du marathon). Merci de m'avoir forcé à sortir (et il fallait de la volonté et de la patience pour y arriver) de m'avoir nourri et abreuvé de rires, de futilités indispensables, de gourmandises. Autant de nourriture spirituelle et spiritueuse qui ont évité la destruction de toute forme de vie sociale. Moments précieux où l'on peut enfin oublier ses sujets de recherches, son dernier métro et s'échapper le temps d'une course en velib', d'une virée sur les rives parisiennes, banlieusardes, celles de la Dordogne, de la Manche ou de la Méditerranée. Un grand merci à Laurence, Cécile, Marine, Pauline, Nadège, Pénélope, Claire L, Amandine, Loraine, Charlotte, Marion DC., Claire A, Domitille, Marion P, Emmanuelle, Julie, Golnessa, Stéphanie, Virginie, Mathieu J., Jérôme, Mathias, Benoît, Louis, Pierre, Pierre-Adrien, Hugo F, Hugo S, Yohan, Philippe, Damien, Sébastien, Edouard, Mathieu M., JC, Shervan, Franck, Thomas S ... Parmi eux je remercie Julien et Cécilia, amis tout particulièrement précieux et parents heureux de Noah, mon petit bout d'adulte préféré. Merci d'avoir fait de moi une marraine comblée. Merci également à ses grands-parents, Zaza et Clément qui m'ont accueilli dans ce doux paradis de la Cadière d'Azur à un moment clé de ma thèse. I address my thoughts to my dear shining friends from overseas that have a dedicated space in my heart. Maria, Barbara, Johana, I will now have

more time to visit you and spend good times between Paris, Bruxelles, London, Mytilene, Vienna, and Edinburgh.

A ma jolie famille, merci de m'avoir accueillie en votre sein avec tant de confiance et de tendresse et de m'avoir ouvert votre belle demeure de Septeuil, un havre de paix où il est délicieux de cultiver son jardin.

A ma famille ; ma mère, qui n'a jamais su tout à fait se souvenir de l'anagramme de mes lieux de travail, ce qui ne l'empêche pas de me couvrir d'un amour indéfectible qui m'enveloppe, m'entoure et me propulse, depuis même avant ma naissance. A mon père, pour qui je fais tout ce que je fais et grâce à qui je le réussis avec la satisfaction et la leçon de vie de le faire par mes propres moyens. A ma sœur retrouvée Junie et ses trois merveilleuses filles, Lou, Jeanne et Nine que j'ai hâte de voir grandir et de leur insuffler, si tant est qu'elles en manquent, la curiosité qu'il faut pour aller toujours plus loin. A ma sœur Maud. Mon admiration et ma tendresse pour toi ont toujours porté mon ambition et ma volonté d'être à ta hauteur. Merci Guillaume de la faire resplendir et s'affirmer.

A Vincent qui me fait voyager, rire, réfléchir, persévérer, avancer, me dépasser, aimer et être aimée.

Avant-Propos

Si la transition énergétique m'était contée ;
La fable de la baleine, du paresseux et de la chauve-souris¹

La nature abrite nombre d'organismes qui ont développé un mode de vie leur permettant de contourner, de compenser les contraintes qui s'imposent à eux.

La baleine bleue, le plus grand des mammifères, adopte un régime alimentaire particulier unique : le krill. Pour faire fonctionner pendant 80 ans son organisme lourd de 170 tonnes, elle doit ingurgiter quotidiennement 3,6 tonnes de ce plancton. Son mono régime à la fois microscopique et gargantuesque lui procure l'énergie nécessaire pour croître jusqu'à l'âge adulte, effectuer des plongées toutes les 10 à 20 minutes, mener une vie sociale remplie de chants et de danse, et assurer lors de la reproduction, une gestation de 10 à 12 mois.

Les Chiroptères² ont, pour leur part, choisi de développer une spécialisation propre, leur permettant de maximiser le champ possible de leurs proies tout en limitant leurs prédateurs. Ils ont choisi la vie nocturne pour éviter à la fois les concurrents et les ascendants de la chaîne alimentaire, et usent de leur sonar pour diversifier leur alimentation et éviter les dépendances alimentaires en se constituant un « garde-manger » à trois dimensions.

D'autres organismes ont à l'inverse décidé d'adapter leurs besoins et leur métabolisme à leur environnement en pesant le moins possible sur ce dernier. Les Paresseux, mammifères arboricoles d'Amérique tropicale de la famille des Folivores, optent pour un mode de fonctionnement délibérément frugal mais extrêmement efficace en survivant avec un minimum de nourriture et une gestion optimale de leurs besoins énergétiques. Ces mammifères maintiennent en effet une température corporelle entre 23° et 32°, dorment 12 heures par jour et se déplacent à la vitesse de 0,6 km par heure.

Dans l'histoire des civilisations, les plus grandes puissances se sont d'abord développées en privilégiant la puissance à l'efficacité en ayant prioritairement recours à des ressources énergétiques malléables, disponibles immédiatement, en grande quantité et en continu. Cette

¹ Ces réflexions sont issues des échanges et des interventions suivies lors de l'Ecole Energie et Recherches organisée du 13 au 18 mars 2016 à la Station Biologique de Roscoff. <http://eer.in2p3.fr/>

² Chauve-souris.

énergie a été tour à tour mesurée en nombre d'esclaves, chevaux, terrils et wagons-trémies puis en barils grâce à l'ingéniosité humaine et son opiniâtre volonté de puissance. Les révolutions scientifique puis industrielle amorcées à la Renaissance pour culminer au XXème siècle n'ont fait que démultiplier la capacité humaine à mobiliser et consommer cette énergie sans en changer la logique fondamentale.

Peut-on sortir de ce paradigme qui impose que l'énergie se conçoive comme un stock que l'on se doit de capturer jusqu'à l'épuisement ? Toute alternative a été très longtemps écartée en prenant la nature à témoin; n'est-elle pas elle-même constituée de métabolismes optimaux en termes de rendements-puissance plutôt qu'en rendements-efficacité? Il n'en est rien.

La Baleine Bleue semble proche de nous par le gigantisme de son appétit. Si nous fondons notre survie sur notre taille et notre capacité à tordre les incohérences naturelles dont nous faisons preuve, il nous faut alors trouver une ressource unique, accessible en grande quantité en espérant que l'air sera encore respirable entre deux coulées et que nous parvenions *in fine* à caler notre ambition démographique et alimentaire sur le seuil de prélèvement juste supportable pour le renouvellement de la ressource.

Avec un peu d'ingéniosité, il est possible, comme une chauve-souris, de trouver une autre manière de satisfaire sa faim. La diversification des ressources et l'utilisation d'un nouveau terrain de jeu peut permettre l'atteinte d'un idéal de croissance, mais cela reste une stratégie de niche basée sur des concepts de discrétion et d'exclusion ce qui paraît fort peu adapté à une espèce forte de 7 milliards d'individus.

La troisième voie, celle du paresseux, est ironiquement la plus ambitieuse. Elle appelle à un retournement des forces qui consiste en une adaptation complète de nos besoins et de nos modes de fonctionnement à notre environnement. C'est une solution durable et soutenable jusqu'à la prochaine ère géologique, mais si elle n'est pas adoptée simultanément, collégialement, est-elle seulement envisageable ? D'autre part, est-elle pleinement réalisable et même satisfaisante d'un point de vue pratique (peut-on raisonnablement imaginer un paresseux traversant une route sans dommages) ?

C'est une décision qui va pourtant nous incomber d'ici la fin de ce siècle : une transition énergétique d'un système (métabolisme) efficace en puissance (système de stock) vers un système efficace en termes de rendement (système de flux). L'énergie en stock est une ressource issue du temps : ce sont des ressources d'accumulation fossiles présentes sous forme de nombreux

réservoirs logés dans la croûte terrestre et donc épuisables à terme ; lorsque tous les réservoirs seront vides ou plus vraisemblablement lorsque les systèmes économiques ne pourront plus se les offrir et chercheront des alternatives moins onéreuses. Les énergies en flux sont des énergies renouvelables et inépuisables comme le vent, le soleil, la chaleur terrestre et l'énergie marine. A la différence des énergies stock, les énergies flux sont diffuses et moins maîtrisables, ce qui les a placées en second choix dans l'ordre de mérite énergétique des premières révolutions industrielles.

La mise en place de cette transition requiert de développer des mutations profondes qui vont nous permettre de fonctionner de manière optimale, non plus en misant sur la puissance des organismes (utiliser la source d'énergie la plus facilement disponible à son point de fonctionnement maximal) mais sur leur efficacité. Ce dernier terme combine à la fois la notion d'efficacité physique (faire mieux avec moins), écologique (faire autrement avec les ressources qui nous sont prêtées) et économique (mobiliser à leur juste potentiel les ressources immatérielles et financières dont nous disposons aujourd'hui et demain). Le défi est alors d'adapter les comportements, les besoins, et un mode de vie à des contraintes de ressources fortes, sans pour autant renoncer à ce qui a fait et continue de faire notre plus grande qualité : notre appétit pour la vie.

Résumé

Les acteurs de l'économie mondiale doivent s'engager dans une transition énergétique bas-carbone afin de s'aligner avec les objectifs réitérés lors de la COP21 de limiter les dérèglements climatiques induits par l'activité humaine. Les besoins d'investissements publics et privés sont massifs et courent sur le long terme. La question du financement de cette transition et du rôle du secteur financier et de ses intermédiaires privilégiés – banques et assureurs dans le cas de la France et de l'Europe – est donc cruciale. Dans cette perspective, deux facteurs de réussite sont identifiés pour la réalisation de cette transition ; ils sont l'objet de cette thèse.

En premier lieu, la recherche d'efficacité énergétique, en particulier dans le secteur du logement, premier consommateur en énergie finale est un levier de transition clé pour les économies développées. La réussite d'une transition énergétique bas-carbone est conditionnée par la capacité des acteurs à massifier un marché privé très diffus et fortement intermédié, provenant essentiellement des ménages. En second lieu, il est impératif de réaligner les flux financiers vers des actifs, énergétiques et non énergétiques, compatibles avec un budget carbone limité par la contrainte d'un réchauffement climatique en deçà de 2°. Ces deux facteurs sont traités en trois points qui structurent cette thèse

Il faut d'abord comprendre la nécessité d'adopter une analyse différenciée de la consommation énergétique des ménages, en particulier celle liée à leur logement, dans la recherche d'adéquation des objectifs macroéconomiques avec ceux qui sous-tendent les arbitrages financiers et économiques individuels. Le premier chapitre conduit une analyse par typologie des dépenses énergétiques des ménages et propose une segmentation des comportements microéconomiques des acteurs et du marché de la transition énergétique dans le logement. Il faut ensuite trouver une manière de valoriser les investissements privés dans la transition énergétique, encore aujourd'hui difficiles à massifier notamment lorsqu'il est question de la performance énergétique du logement. Le chapitre 2 propose un modèle issu d'une technique d'optimisation par les fonctions frontières, pour rendre compte de la présence d'une valeur verte sur un marché local du logement privé en France. Enfin il s'agit d'intégrer les multiples risques liés au changement climatique au sein de la cartographie des risques financiers finaux (spécifiques, systématiques et systémiques) qui pèsent sur les institutions financières, dans la conduite de leur activité mais aussi dans l'évaluation du profil de risque de leur bilan. Les intermédiaires financiers mais également les institutions qui les régulent ont un rôle clé à jouer dans l'établissement d'une valeur sociale du carbone endogène aux marchés financiers (chapitre 3).

Abstract

This thesis deals with the main challenges that we need to address to foster the private financing of a low-carbon energy transition. A massive amount of investment in low-carbon assets is needed and most of the effort must come from final energy consumers such as households. Their ability as well as the ability of the financial intermediaries (that is banks in Europe) to trigger low-carbon investments and manage their risk profile is the key for a successful low-carbon energy transition in France and in every industrialized economy. These researches focus more particularly on the residential housing sector which represents 30,2% of the final energy consumption and 21% of the total greenhouses gases emissions in France. The first chapter of this thesis takes the stand that only a disaggregated approach can reconcile macroeconomic objectives to reduce final energy consumption and microeconomic arbitrages regarding energy consumption in the housing sector. Using segmentation and decision tree growing econometric techniques, the chapter proposes a typology of energy spending and a segmentation analysis and of the energy transition “market” in the French residential housing sector. The second chapter uses frontier functions estimation technique on a local private housing market to determine if selling prices contain a “Green Property Value”. An empirical analysis is then conducted to determine if this value can offset the upfront cost of energy retrofit. The last chapter takes the prism of the financial institutions. It attempts a first evaluation of the impact and exposition to climate related risks, those are physical, transition, liability and systemic risks, on the banking system and its prudential regulation framework. After describing the effects of climate related risks on the final risk profile of banks, we discuss the best way to integrate these risks in the financial risks cartography and address the challenge of the carbon footprint measurement. A proposition is finally made to rethink prudential regulation tools to reflect the climate challenges addressed by the COP 21 Paris agreement.

INDEX

REMERCIEMENTS	I
AVANT-PROPOS	IV
RÉSUMÉ	VII
ABSTRACT	VIII
INDEX.....	IX
LIST OF FIGURES	XI
LIST OF TABLES.....	XII
INTRODUCTION GENERALE	1
1. CONTEXTE	1
2. MOTIVATIONS ET QUESTION DE RECHERCHE	6
3. ORGANISATION	9
4. REFERENCES.....	20
CHAPTER 1. UNDERSTANDING ENERGY CONSUMPTION IN THE FRENCH HOUSING MARKET	23
ABSTRACT	23
1. INTRODUCTION	25
2. LITERATURE REVIEW ON EMPIRICAL APPROACHES TO MEASURE ENERGY DEMAND AND REBOUND EFFECT	27
3. METHODOLOGY: DECISION TREE GROWING ANALYSIS USING CHAID METHOD.....	33
4. DATA AND EXPLANATORY VARIABLE SELECTION.....	38
5. RESULTS.....	42
6. CONCLUSION AND POLICY IMPLICATIONS.....	56
7. REFERENCES.....	59
8. APPENDICES.....	63
9. POSTER.....	66
CHAPTER 2. GREEN PROPERTY VALUE IN THE FRENCH RESIDENTIAL HOUSING SECTOR.....	67
ABSTRACT	67
1. INTRODUCTION	69
2. GREEN PROPERTY VALUE: DEFINITION AND OBJECTIVES	72
3. METHODOLOGY	76
4. DATA AND RESULTS	83
5. EMPIRICAL APPLICATION AND DISCUSSION.....	95
6. CONCLUSION	97
7. REFERENCES.....	98

8.	APPENDICES	103
CHAPITRE 3. LES ENJEUX DE LA TRANSITION ENERGETIQUE POUR LE SECTEUR FINANCIER.....		111
1.	INTRODUCTION.....	112
2.	UNE VALEUR SOCIALE DU CARBONE PEUT-ELLE ÊTRE GÉNÉRÉE SUR LES MARCHÉS FINANCIERS?	115
3.	L'INTÉGRATION DES RISQUES CLIMATIQUES DANS LE SECTEUR FINANCIER	123
4.	COMMENT MESURER UNE EXPOSITION AUX RISQUES CLIMATIQUES ?.....	148
5.	LE RÔLE DE LA RÉGULATION FINANCIÈRE ET BANCAIRE DANS L'INTÉGRATION DES RISQUES CLIMATIQUES	164
6.	CONCLUSION	177
7.	REFERENCES	181
8.	ANNEXES	191
CONCLUSION GENERALE		194
	CONCLUSION GÉNÉRALE	194

LIST OF FIGURES

FIGURE 1. EMISSIONS ANTHROPIQUES GLOBALES 1970-2010	2
FIGURE 2. STOCK DE GES ACCUMULÉ ENTRE 1750 ET 2011	2
FIGURE 3. ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE PAR SECTEUR EN FRANCE	5
FIGURE 4. ARBITRAGES MICROÉCONOMIQUES DES MÉNAGES DANS LEUR LOGEMENT : LE TRILEMME DES BESOINS	11
FIGURE 5. POIDS DES CRÉDITS AU SECTEUR NON FINANCIER PRIVÉ AU PIB FRANÇAIS.....	18
FIGURE 6: ENERGY CONSUMER PRICE INDEX IN FRANCE	29
FIGURE 7. THE CHAID ALGORITHM.....	34
FIGURE 8. FINAL CHAID SEGMENTATION TREE FOR FRENCH HOUSEHOLDS’ ENERGY CONSUMPTION	44
FIGURE 9. LIHC INDICATOR AND FUEL POVERTY GAP	47
FIGURE 10. VENN DIAGRAM OF FUEL POVERTY INDICATORS	48
FIGURE 11. HOUSES MARKET MAPPING	53
FIGURE 12. FLAT MARKET MAPPING	54
FIGURE 13. ENERGY EFFICIENCY DISTORTION SCORE	55
FIGURE 14. FRONTIER FUNCTION ILLUSTRATIVE EXAMPLE	78
FIGURE 15. DIJON URBAN AREA IN BOURGOGNE – FRANCHE-COMTÉ.....	84
FIGURE 16. DATA LOCALISATION POINTS ON DIJON URBAN AREA MAPS	84
FIGURE 17. HISTOGRAM OF DEA AND MLE FRONTIERS WRT NORMAL DISTRIBUTION	90
FIGURE 18. COLLECTIVE DWELLINGS PRICES SET ESTIMATED USING MLE FRONTIER ESTIMATES.....	91
FIGURE 19. INDIVIDUAL HOUSE PRICES SET ESTIMATED SET USING MLE FRONTIER ESTIMATES.....	92
FIGURE 20 : INVESTISSEMENT TOTAL DANS LES ÉNERGIES RENOUVELABLES (EN MILLIARDS DE DOLLARS)	113
FIGURE 21. RÉPARTITION PAR ZONE GÉOGRAPHIQUE DES PRINCIPAUX RISQUES PHYSIQUES A COURT MOYEN ET LONG TERME .	126
FIGURE 22. NOMBRE DE CATASTROPHES NATURELLES ENREGISTRÉES AU NIVEAU MONDIAL DEPUIS 1980	129
FIGURE 23. PERTES CAUSÉES PAR LES CATASTROPHES NATURELLES (ASSURÉES ET NON-ASSURÉES) ENTRE 1980 ET 2016	129
FIGURE 24. MECANISMES DE TRANSMISSION DES RISQUES CLIMATIQUES PHYSIQUES	133
FIGURE 25. SCHEMA DE TRANSMISSION DES RISQUES CLIMATIQUES DE TRANSITION AUX RISQUES DE MARCHÉ	141
FIGURE 26. CANAUX DE TRANSMISSION DES RISQUES CLIMATIQUES AUX RISQUES DE CRÉDIT	141
FIGURE 27. RISQUES DE TRANSITION ET VULNÉRABILITE DES SECTEURS ET ACTEURS EXPOSÉS	142
FIGURE 28. RISQUES CLIMATIQUE SYSTEMIQUE : RISQUES PHYSIQUES ET EFFETS DE SECOND TOUR	147
FIGURE 29. ESTIMATION DES NIVEAUX DE RÉCHAUFFEMENT ASSOCIÉES AUX TRAJECTOIRES D’EMISSION DU GIEC ET LEUR PROBABILITÉ DE RÉALISATION	153
FIGURE 30. TRAJECTOIRES D’ÉMISSIONS DE GES ENTRE 2000 ET 2100 DU GIEC (RCP)	155
FIGURE 31. STRUCTURE DE BILAN BANCAIRE EXIGENCES REGLEMENTAIRES.....	167
FIGURE 32. LES TROIS PILIERS DE LA RÈGLEMENTATION BÂLOISE.....	169

FIGURE 33. INTERVALLES DE RÉALISATION DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SELON LES TRAJECTOIRES D'ÉMISSIONS DE GES DU GIEC	172
FIGURE 34. TRAJECTOIRES D'ÉMISSION ET RISQUES ASSOCIÉS	173
FIGURE 35. CADRE MACROPRUDENTIEL EXISTANT (CRR ET CRDIV)	176
FIGURE 36. ADAPTATION DU CADRE MACROPRUDENTIEL AUX ENJEUX CLIMATIQUES	176
FIGURE 37. CARTOGRAPHIE DES DÉRÈGLEMENTS PHYSIQUES ISSUS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE	191
FIGURE 38. INFOGRAPHIE DES CATASTROPHES NATURELLES MONDIALES ET LEUR PERTES ASSOCIÉS EN 2016	192
FIGURE 39. SCHÉMA DE SEGMENTATION DE LA TRANSITION ÉNERGETIQUE DANS LE LOGEMENT RÉSIDENTIEL.....	196

LIST OF TABLES

TABLE 1. PERFORMANCE DU PARC RÉSIDENTIEL EN FRANCE EN 2013	13
TABLE 2. HOUSEHOLDS ENERGY EXPENDITURES AND EFFORT RATES IN FRANCE IN 2013	26
TABLE 3. PRICE AND INCOME ELASTICITIES TAXONOMY AND EXAMPLE FOR THE ENERGY DEMAND	28
TABLE 4. KEY PREDICTORS SELECTED FOR DECISION TREE GROWING ANALYSIS	42
TABLE 5. RESIDENTIAL HEATING FUEL TECHNOLOGY AND ENERGY MIX BETWEEN 1999 AND 2013	43
TABLE 6. FUEL POVERTY INDICATORS IN FRANCE IN 2013	48
TABLE 7. RETROFIT MARKET IN FRANCE	70
TABLE 8. INFERENCE SUMMARY FOR CHOSING A MODEL	79
TABLE 9. DIJON HOUSING MARKET CHARACTERISTICS	85
TABLE 10. ENERGY LABEL REPARTITION	85
TABLE 11. DESCRIPTIVE STATISTICS FOR COLLECTIVE DWELLINGS	86
TABLE 12. DESCRIPTIVE STATISTICS FOR INDIVIDUAL HOUSES	87
TABLE 13. DIJON DISADVANTAGED DISTRICTS	88
TABLE 14. EFFICIENCY FRONTIER COEFFICIENTS AND SIGNIFICANCE TEST	90
TABLE 15. RESULTS FOR INDIVIDUAL HOUSES	92
TABLE 16. RESULTS IN REDUCED FORM FOR COLLECTIVE DWELLINGS	93
TABLE 17. GREEN PROPERTY DISCOUNT FOR INEFFICIENT HOMES	95
TABLE 18. COST BENEFIT ANALYSIS	96
TABLE 19. BOOTSTRAP ESTIMATION OF TOBIT REGRESSION ON INDIVIDUAL HOUSES DATA SAMPLE	106
TABLE 20. BOOTSTRAP ESTIMATION OF TOBIT REGRESSION MODEL ON COLLECTIVE DWELLINGS DATA SAMPLE	107
TABLE 21. STAGE 2 REGRESSION ON FRONTIER RESIDUALS FOR COLLECTIVE DWELLINGS	108
TABLE 22. STAGE 2 REGRESSION ON FRONTIER RESIDUALS FOR INDIVIDUAL HOUSES	109
TABLE 23. REAL CASES UPFRONT COSTS PER HOUSING TYPE, CONSTRUCTION PERIOD AND HEATING TYPE	110
TABLE 24. ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE PAR SECTEURS (APPROCHE PAR L'UTILISATEUR FINAL)	139
TABLE 25. POIDS DES SECTEURS DANS LE PIB	139
TABLE 26. EXEMPLES D'ÉTUDES PROSPECTIVES UTILISANT LES SCÉNARIOS DANS LE SECTEUR DE L'ÉNERGIE	158

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ou IPCC³) a été créé en 1988 en vue de « fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade »⁴. Depuis lors, le GIEC a établi cinq rapports d'évaluation et reçu le prix Nobel de la Paix en 2007. Le 4^{ème} rapport, paru en novembre 2004, a montré que l'être humain était responsable d'un changement climatique significatif. Dix ans plus tard, dans le 5^e rapport⁵, il affirme que l'activité humaine émettrice de gaz à effet de serre⁶ (ou GES) et le réchauffement climatique qui en résulte, ont transformé la fréquence des événements climatiques extrêmes de manière irréversible. Il aboutit également à cinq conclusions importantes :

- 1) Les émissions anthropiques de CO₂ (dioxyde de carbone), CH₄ (méthane), N₂O (protoxyde d'azote) et F-gaz (gaz fluorés), sont à l'origine des perturbations climatiques majeures depuis l'ère industrielle et ont augmenté à partir des années 1990. En 2010, l'humanité a émis 49 Gigatonnes équivalent CO₂ de GES, avec un taux de croissance qui n'a cessé d'augmenter de 2,2 % par an depuis 2000 contre 1,3 % par an entre 1970 et 2000 (Figure 1). Sans limitations, les températures augmenteront jusqu'à 2,6° d'ici 2065 et à 4,8°⁷ d'ici 2100.
- 2) Les émissions de GES sont composées à 77% de CO₂⁸ dont 85% (65% du total) correspondent au CO₂ émis lors de la combustion d'énergies fossiles (charbon, gaz naturel et pétrole) pour la production d'énergie ou comme matière première industrielle (industrie chimique et des procédés). Alors dans une proportion équivalente à celle des émissions de CO₂ provenant de l'utilisation des sols et des forêts entre 1750 et 1970 (Figure 2), la combustion des énergies fossiles est responsable des deux tiers du stock d'émissions de GES (soit 32 Gigatonnes d'équivalent CO₂). Leur utilisation exponentielle depuis les années 1950 est dû au fait qu'elles alimentent encore 80 % du

³ *Intergovernmental Panel on Climate Change.*

⁴ Source : https://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml.

⁵ https://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml

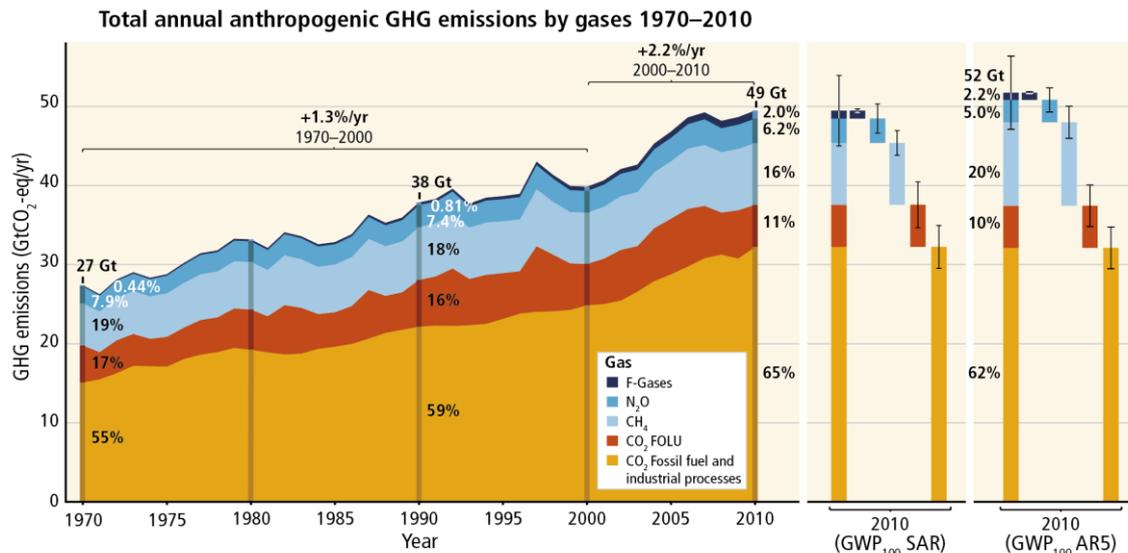
⁶ Les gaz à effet de serre (GES) sont des composants gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et contribuent à l'effet de serre. Les principaux GES présents dans l'atmosphère sont : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ozone (O₃).

⁷ Intervalle haut des plages probables (de 5% à 95%) d'augmentation des températures par rapport à la période de référence 1986-2005.

⁸ Le méthane représente 16% des émissions, les oxydes nitreux 6,2% et les gaz fluorés 2%.

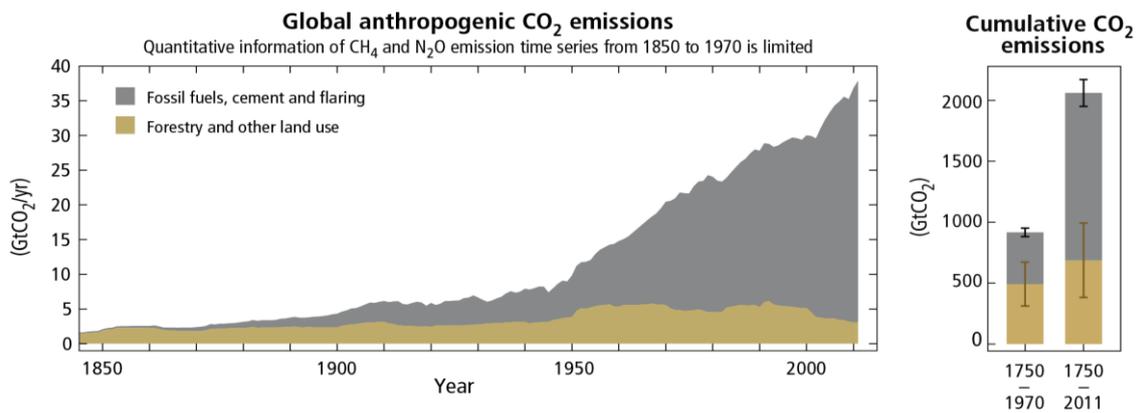
mix énergétique mondial en 2015 (World Energy Outlook, 2016) soit un rythme de production de 5,27 Gigatonnes d'équivalent pétrole. Le charbon est la seconde énergie primaire utilisée au monde mais c'est surtout la plus polluante. Il représente 44% des émissions de CO₂, suivi par le pétrole (36%) et le gaz (20%).

FIGURE 1. EMISSIONS ANTHROPIQUES GLOBALES 1970-2010



SOURCE : IPCC (AR5, SPM)

FIGURE 2. STOCK DE GES ACCUMULE ENTRE 1750 ET 2011



SOURCE : IPCC (AR5, SPM)

- 3) Quel que soit l'objectif de limite du réchauffement climatique à ne pas dépasser, (1°, 2°, 3° ou même 4°), le flux annuel d'émission de GES devra être réduit à zéro. En effet, c'est le stock de gaz accumulé dans l'atmosphère qui détermine la capacité de celle-ci à renvoyer le rayonnement solaire et à limiter le réchauffement, et non le flux de GES émis chaque année. Chaque niveau de stock de GES détermine un degré de réchauffement. Si le stock s'accroît, le réchauffement ne

s'interrompt pas. Selon l'objectif mondial assigné, il reste plus ou moins de marge de manœuvre en termes de temps imparti et de rythme de réduction des émissions nouvelles, mais elles devront être réduites à un niveau de neutralité carbone si l'on veut stopper tout réchauffement à terme.

- 4) Pour éviter des altérations climatiques catastrophiques (réduction de la biodiversité, menace sur le littoral, inondations et sécheresses accrues, etc.) et un désastre humanitaire (menaces sur la sécurité alimentaire, explosion des réfugiés climatiques, etc.), la hausse des températures doit se stabiliser à un réchauffement en-deçà de 2°. Pour réaliser cet objectif, la planète dispose d'un « budget carbone⁹ » de 3670 Gigatonnes équivalent-CO₂ (GIEC AR5). Une large moitié de ce « budget » a été consommée entre 1870 et 2011, soit environ 1950 Gigatonnes de CO₂ sur 3670 (Figure 2). Si l'on veut respecter cette limite, le niveau d'émissions cumulées ne devra pas dépasser les 1 000 Gigatonnes sur la totalité de notre ère.

- 5) A contrainte budgétaire « 2° compatible » espérée selon les calculs du GIEC, autrement dit pour avoir une probabilité de plus de 50 % de restreindre le réchauffement climatique en deçà de 2°, une grande partie des réserves d'énergies fossiles ne peuvent pas être utilisées (rappelons que leur combustion est responsable de 35 Gigatonnes CO₂ par an et augmentent de 2,2% tous les ans). Plusieurs études scientifiques et économiques ont tenté une estimation du montant des réserves en énergies fossiles que ce budget carbone pouvait représenter (et donc du volume résiduel qui doit rester intouché ou imbrulé pour que la limite des 2° soit respectée). Ces études (Leaton, James, Ward et Bob, 2013 ; Griffin et al. 2015 ; McGlade et Ekins, 2015) estiment que 82 % des réserves mondiales (90 % des réserves de charbon ; 49 % des réserves gaz et 33 % des réserves de pétrole) doivent rester enfouies et inexploitées. De l'émergence de cette notion de « carbone imbrutable » (ou « Unburnable Carbon ») va naître une grande partie des réflexions sur les conséquences pour nos économies, non seulement des risques associés au changement climatique mais également des risques associés à la mise en route d'une transition énergétique où l'ensemble des pays parviennent à respecter le budget carbone mondial.

L'Union européenne, en particulier la France organisatrice de la COP 21 (ou 21^e Conférence des Parties¹⁰), fait office d'exemple dans l'édiction des contributions nationales exigées lors de la

⁹ Stock limite de gaz à effets de serre concentré dans la composition atmosphérique générant une hausse de la température de 2° du fait de l'altération de ses capacités absorbatives et réfléchives des rayonnements solaires.

¹⁰ La Conférence des Parties est un rendez-vous annuel organisé par les pays signataires de la première convention climat, tenue à Rio en 1992. La première Conférence des Parties se réunit à Berlin en mars 1995, et reconnaît la nécessité d'un renforcement des engagements des pays développés. Elle fixe par pays et par région d'une part des objectifs quantifiés de réduction ou de limitation des émissions, et d'autre part des politiques et mesures. La troisième COP se réunit à Kyoto au Japon en 1997 et débouche sur la signature du protocole de Kyoto qui marque le début du premier marché de permis de quotas carbone, l'EU ETS (*European Union Emission Trading Scheme*).

signature de l'Accord de Paris. Une année après la publication du rapport du GIEC et dans la continuité des orientations européennes, les objectifs nationaux français sont retranscrits dans la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (ci-après référée à LTECV) votée en août 2015. Les objectifs cités préfigurent l'engagement de la France dans une Stratégie Nationale Bas Carbone¹¹ présentée en novembre 2015, qui représente les efforts fournis au titre de la contribution nationale pour la COP21 et figure parmi les premières politiques à utiliser le concept de budget carbone dans l'édiction de ses objectifs publics :

1) Réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % d'ici 2030 et les diviser par quatre d'ici 2050 par rapport aux niveaux de 1990 ;

2) Réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence 2012, en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030. Cette dynamique soutient le développement d'une économie efficace en énergie, notamment dans les secteurs du bâtiment, des transports et de l'économie circulaire, et préserve la compétitivité et le développement du secteur industriel ;

3) Réduire la consommation énergétique primaire des énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à l'année de référence 2012, en modulant cet objectif par énergie fossile en fonction du facteur d'émissions de gaz à effet de serre de chacune ; sachant que le mix énergétique primaire de l'Union européenne (UE) à 28 est composé de 74 % d'énergies fossiles et celui de la France de seulement 49 %, en raison de l'importance de sa production nucléaire ;

4) Porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % en 2030. A cette date, pour parvenir à cet objectif, les énergies renouvelables doivent représenter 40 % de la production d'électricité, 38 % de la consommation finale de chaleur, 15 % de la consommation finale de carburant et 10 % de la consommation de gaz ;

5) Réduire la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % à l'horizon 2025 (par rapport à un mix énergétique basé en 2015 à plus de 75% d'électricité provenant du nucléaire).

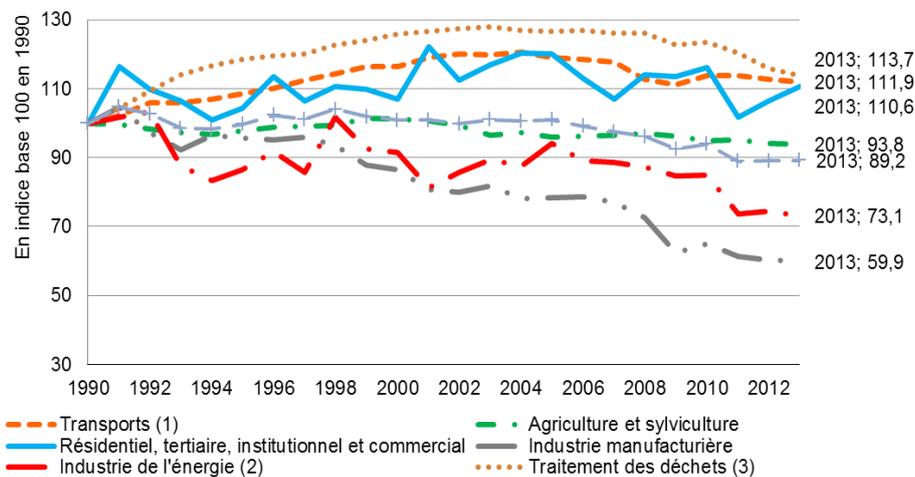
Comment atteindre les objectifs fixés à l'échelle mondiale, européenne, et nationale ? Quels sont les enjeux et les besoins pratiques d'une transition énergétique bas-carbone vertueuse ? Comment le financement de la transition énergétique peut-il s'accomplir dans la pratique ? **L'objectif de cette thèse est de comprendre les besoins et enjeux de la transition énergétique bas-carbone en France sous l'angle de sa mise en œuvre pratique et de son financement.**

Dans ce cadre, nous accordons une attention toute particulière au cas du logement, secteur clé de la transition énergétique. Le logement représente à lui seul près de 45 % de la consommation finale

¹¹ Décret N° 2015-1491 du 18 novembre 2015 relatif aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone 2015.

du pays en énergie en 2015 (chiffres SOeS). Talonné par le transport (31 %) mais loin devant l'industrie (20 %). Logement résidentiel est un secteur fortement consommateur d'énergie finale et représente à lui seul 30,2% de la consommation finale. Le poids du logement est moindre lorsque l'on mesure l'empreinte carbone (en millions de tonnes de CO₂) de chaque secteur et non plus la consommation finale (en KWh). En effet, avec un mix énergétique de faible intensité carbone grâce à une production d'électricité majoritairement nucléaire (76,3 % en 2015), le logement est responsable de 24 % des émissions de gaz à effet de serre au niveau national (SOeS). Il est à la seconde place, derrière le transport (28 %), et talonné par l'agriculture (19 %) et l'industrie (hors énergie) (16,5 %). Ne faisant pas partie des secteurs concernés par le protocole de Kyoto et la mise en place du marché européen des quotas carbone (EU ETS), les émissions des secteurs du logement et du transport n'ont cessé d'augmenter en tendance depuis 1990 contrairement à celles de l'industrie (secteur de l'énergie et secteur manufacturier) (Figure 3). Cette différence de tendance est aussi largement expliquée par le fait que les secteurs du logement et du transport sont des secteurs de consommation de services énergétiques issus de l'expression de besoins et d'arbitrages microéconomiques émanant des ménages.

FIGURE 3. ÉVOLUTION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE PAR SECTEUR EN FRANCE



SOURCE : CITEPA, INVENTAIRE CCNUCC, FORMAT "PLAN CLIMAT »

NOTES : (1) HORS UTCF (UTILISATION DES TERRES, LEURS CHANGEMENTS ET LA FORET) ; (1) AERIEN ET MARITIME : TRAFIC DOMESTIQUE UNIQUEMENT ; (2) Y COMPRIS INCINERATION DES DECHETS AVEC RECUPERATION D'ENERGIE ; (3) HORS INCINERATION DES DECHETS AVEC RECUPERATION D'ENERGIE, ET HORS CAPTAGE DE BIOGAZ. CHAMP : FRANCE METROPOLITAINE, DEPARTEMENTS D'OUTRE-MER, SAINT MARTIN (PERIMETRE PROTOCOLE DE KYOTO).

Une fois le choix fait d'utiliser le prisme de la demande et des arbitrages microéconomiques, cette thèse limite son champ d'investigation au seul secteur du logement et ne traite pas de la question du transport, bien que les deux secteurs cristallisent des besoins en services énergétiques et des contraintes très largement communes et complémentaires. La détermination de la qualité énergétique du logement s'effectue en fonction de sa localisation et des besoins en mobilité, la vulnérabilité et la précarité énergétique dans le logement sont intimement liées aux contraintes et dépenses effectuées dans le transport. Les secteurs du transport et du logement sont conjointement associés aux problématiques d'aménagement du territoire. Les questions de l'étalement urbain, de la densité du parc immobilier, des politiques fiscales et budgétaires spécifiques aux dépenses dans le transport et le logement tendent par nature à lier les deux sujets. Le croisement des deux champs d'investigation mériterait à lui seul un travail de recherche à part entière et il semblait bien trop ambitieux de penser traiter rigoureusement ces problématiques d'un seul tenant. L'attention s'est donc portée sur le secteur du logement car il s'agit également d'un secteur clé dans la structure des bilans du secteur bancaire où le crédit immobilier représente 85 % des financements bancaires alloués aux ménages, soit plus de 1 000 milliards d'euros d'encours de crédit bancaire en France en 2016 (chiffres Banque de France).

2. Motivations et question de recherche

Pour que les conclusions du dernier rapport du GIEC soient entendues, les représentations collectives ainsi que les choix économiques individuels doivent drastiquement changer. Pour orienter et guider des choix économiques vertueux, une nouvelle échelle des valeurs liées à la transition énergétique bas-carbone est nécessaire et doit, au besoin, être accompagnée d'un dispositif d'incitation pertinent. Les institutions et décideurs publics internationaux, régionaux et nationaux sont prêts à orchestrer une transition énergétique bas carbone aux niveaux international, régional (européen) et national.

A l'échelle internationale, la transition de l'économie mondiale vers un système énergétique et une croissance pauvre en carbone a été l'objectif officiellement reconnu lors de la COP 21. En décembre 2015, au Bourget, la COP 21 a réuni plus de 185 pays pour lutter contre le réchauffement climatique. L'Accord de Paris représente une avancée diplomatique historique en faveur du climat. Reconnaisant la responsabilité de l'ensemble des économies en matière de changement climatique dangereux pour l'écosystème global, il a mis en avant l'urgence de trouver un moyen de dissocier notre recherche de croissance et de développement des émissions anthropiques de GES, principaux facteurs de la pollution atmosphérique et des dérèglements

climatiques. La mise en œuvre des ambitions prises lors de la COP 21 suppose une prise d'action rapide et chiffrée de la part de l'ensemble des clubs climatiques présents à Paris (Nordhaus, 2015). La COP 21 n'a pour autant pas permis de dégager, ni de prix universel du carbone pourtant tant demandé par certains économistes (Weitzman, 2015 ; Stiglitz, 2015 ; Gollier et Tirole, 2015 ; Cramton, Ockenfels et Stoft, 2015), ni même de dispositif de sanction ou de contrainte dans son texte d'accord final. Sa qualité majeure est qu'il a permis la sortie du cadre exclusif des acteurs publics intervenant usuellement au sein de la Convention Climat des Nations Unies. Un appel à l'inclusion des acteurs non gouvernementaux, sociaux (clubs dits portoalegriens), et économiques (clubs davosiens), dans une dynamique d'ensemble a en effet été lancé et les institutions financières ont été citées au rang d'acteurs clés (Espagne, 2015). Le tour de force majeur de l'accord est probablement entièrement contenu dans l'alinéa C de son article 2 qui stipule l'alignement des flux financiers avec les objectifs d'une transition bas-carbone et l'intégration du secteur de la finance aux forces vives de la lutte contre le changement climatique (Dasgupta et al., 2016). **La question des financements et de la réorientation des flux financiers est l'un des enjeux majeurs de la transition énergétique et un champ d'investigation privilégié dans cette thèse.**

A l'échelle de l'Union européenne, les objectifs environnementaux sont édictés jusqu'en 2020 par l'accord interétatique du Paquet énergie-climat 20-20-20 (appelé également 3 fois20) adopté en décembre 2008 par le Parlement européen et dont les objectifs sont de diminuer de 20% les émissions de GES des pays de l'UE, d'atteindre 20 % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique européen et de réaliser 20 % d'économies d'énergie. Dans la continuité des objectifs de 2020 dont l'horizon temporel est bientôt atteint, la Commission européenne vient de proposer en novembre 2016 un nouveau paquet législatif pour mettre à jour la Directive. Le paquet « hiver » ou « Winter Package » se donne comme objectif d'augmenter de 30 % d'ici à 2030 l'efficacité énergétique des systèmes des Etats membres. Les objectifs de l'Union européenne en matière énergétique sont de deux ordres. Le premier est la décarbonation du mix énergétique européen primaire et secondaire ; cela passe par la réduction de la dépendance aux énergies fossiles et la promotion des énergies décarbonées (nucléaire et renouvelables) ; le second repose sur la réduction de la demande d'énergie : cela passe par une optimisation de la demande (réduire les gaspillages, promouvoir ou inciter à la sobriété énergétique) et par la hausse de la productivité des systèmes énergétiques (efficacité énergétique). Ces enjeux environnementaux sont venus s'ajouter aux deux autres enjeux liés à l'énergie, présents depuis la création de la CECA¹² en 1952

¹² Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier : une organisation internationale fondée sur le traité de Paris (1951) entrée en vigueur le 23 juillet 1952 pour une durée de 50 ans.

et qui sont de trois ordres. En premier lieu, la sécurité de l'approvisionnement énergétique et la recherche d'indépendance vis-à-vis des ressources énergétiques produites en dehors de l'Union européenne (c'est le cas de la très grande majorité des énergies fossiles) ; en second lieu, la compétitivité de ses industries par une énergie fiable et à bas-coûts et par l'augmentation de l'efficacité énergétique ; et enfin la réduction de son empreinte carbone et de ses émissions de GES par la promotion des énergies renouvelables comme les énergies du vent, de la mer, du soleil et de la biomasse. La recherche d'une issue à même de concilier ces trois éléments, qui chapeautent les mesures et politiques énergétiques européennes et nationales, est un enjeu clé (Criqui et Mima, 2012) car certains objectifs sont parfois faciles à articuler : la production d'une énergie locale, décarbonée et renouvelable permet à la fois de réduire son empreinte carbone et de s'assurer une meilleure indépendance aux énergies fossiles, provenant de pays en dehors de l'Union européenne (Umbach, 2010). Ils sont aussi parfois contradictoires ou difficiles à concilier comme l'illustre le dilemme posé dans l'article 194 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne qui rappelle que la politique européenne de l'énergie repose sur la création d'un marché commun de l'énergie tout en conservant la prérogative des États membres sur la détermination de leur mix énergétique, de leurs sources d'approvisionnement ainsi que dans l'exploitation de leurs ressources énergétiques. L'intégration des énergies renouvelables dans un mix énergétique même local créé des distorsions fiscales, et un biais de compétitivité si elles sont subventionnées et des tensions sur le réseau européen de l'électricité, mettant en balance les enjeux de sécurité et de compétitivité précédemment cités¹³ (Chevalier et al. 2012). La recherche d'efficacité énergétique est une issue qui permet d'obtenir un double dividende satisfaisant, c'est-à-dire à la fois d'aller vers une transition énergétique bas carbone, et accroître la productivité des industries et des services tout en réduisant la dépendance de nos économies aux énergies fossiles. C'est le second enjeu majeur abordé dans cette thèse. L'efficacité énergétique *via* l'amélioration de la performance des systèmes de production, de transport et du logement, figure parmi les principaux gisements de la transition bas-carbone.

Les objectifs et engagements obtenus sont ambitieux, à la hauteur de l'enjeu. Ils révèlent, chacun à leur niveau, les besoins principaux de la réussite pratique d'une transition énergétique collégiale.

- 1) Un besoin de réaligement des flux financiers tout d'abord ; encore aujourd'hui très largement orientés vers des systèmes de production qui tirent leur puissance d'un stock

¹³ Par exemple, la mise en service forcée et prioritaire des énergies renouvelables créé une distorsion compétitive sur les centrales à gaz devant assurer les pics de demande, mais aussi une distorsion temporelle et géographique entre le nord venteux et le sud ensoleillé qui vient congestionner les réseaux, en particulier les interconnexions entre l'Allemagne et ses voisins limitrophes comme la Pologne et la Suisse.

d'énergies fossiles. Cela pose la question de la valorisation de la transition énergétique sur les marchés financiers et la manière dont elle est perçue par ses principaux acteurs.

- 2) Un besoin d'investissements nouveaux ensuite ; le passage d'une énergie de stock, dépendante des énergies fossiles, à une énergie de flux qui repose sur un système décarboné et renouvelable, nécessite des investissements colossaux dans des secteurs et des technologies clés. Cela requiert de s'interroger sur le problème de rentabilité de ces investissements, à l'échelle individuelle comme à l'échelle d'un marché.
- 3) Enfin, un besoin d'adhésion et de massification des efforts en matière de consommation énergétique : les gisements à même de réduire l'empreinte carbone et d'optimiser la consommation se trouvent dans les secteurs diffus du transport et du logement et passent par la recherche d'efficacité énergétique. Ils sont conditionnés par l'acceptation des acteurs finaux de ces secteurs : les ménages. Cela requiert une adéquation entre les objectifs macroéconomiques et les arbitrages microéconomiques.

Pour que ces trois besoins précédemment énoncés soient satisfaits, l'enjeu est de trouver « le juste prix » au sens de Thomas d'Aquin, un prix naturel à la nature qui reflète les réciprocitys entre la croissance de nos sociétés aujourd'hui et leur développement demain. Or l'on se heurte aux difficultés encore aujourd'hui de voir une juste valeur de ces enjeux se dessiner non seulement (i) au sein des sphères politiques et intergouvernementales, mais aussi (ii) au niveau des ménages au moment de leurs arbitrages de consommation énergétique au quotidien et enfin (iii) à l'échelle des acteurs financiers, marchés et institutions, qui doivent intégrer ces enjeux dans leurs activités d'investisseurs de financeurs et de gestionnaires des risques. **La question qui structure cette recherche est donc de déterminer comment orchestrer et harmoniser une transition énergétique bas-carbone à l'échelle des acteurs qui doivent l'investir, autrement dit les ménages (chapitres 1 et 2), et ceux qui doivent la financer : les intermédiaires financiers avec une attention particulière portée sur les banques (chapitre 3).**

3. Organisation

Les deux premiers chapitres de cette thèse se concentrent avant tout sur les leviers de compréhension et de réalisation des objectifs microéconomiques des différentes parties prenantes (ménages, financeurs et investisseurs) à leur réalisation au niveau macroéconomique en particulier dans la recherche d'efficacité énergétique dans le logement.

3.1. Chapitre 1

Lorsque l'on parle de baisse de la consommation, on parle plus favorablement de gains d'efficacité énergétique mais la relation entre efficacité et efficacité environnementale est plus difficile à appréhender et peut faire l'objet de désalignement entre les outils de politiques énergétiques déployés et leur capacité à atteindre l'objectif fixé ou leur rentabilité ex-post.

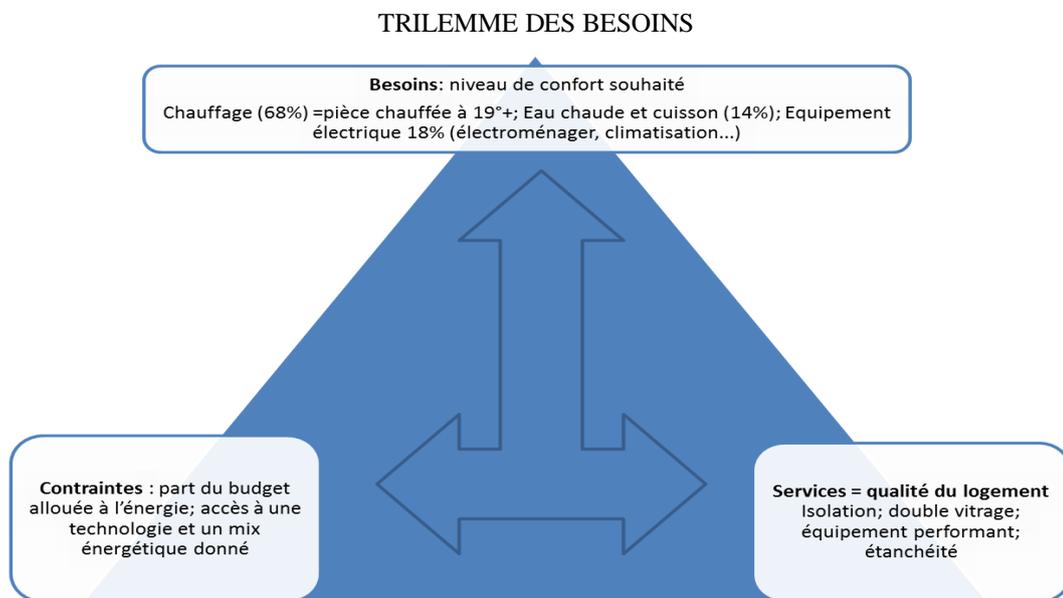
Pourtant, afin que se concrétise une réduction effective de la consommation énergétique du secteur résidentiel, l'approche macroéconomique ne suffit pas. Il faut prendre en compte les usages, besoins et arbitrages microéconomiques des ménages qui habitent ces logements. Le **chapitre 1** se penche ainsi sur le point de passage entre l'approche macroéconomique et l'approche comportementale en matière de demande d'énergie dans le logement en commençant par poser la question suivante : qu'est-ce qu'un bâtiment performant ? Un bâtiment performant se caractérise-t-il par sa capacité à minimiser la consommation d'énergie ou alors par sa capacité à répondre efficacement aux besoins de ses habitants ? Les bâtiments et constructions labellisés Bâtiment basse consommation (BBC) et Bâtiments à énergie positive (BEPOS), qui sont considérés comme étant des optimums de performance technologique, sont extrêmement contraignants en termes d'usages et de modalités de fonctionnement au point que de nombreux retours d'expérience ont montré que les gains en matière de consommation énergétique étaient en deçà des gains modélisés au niveau global. Cet écart était principalement dû à une mauvaise évaluation des comportements des ménages dans ces logements et à l'incompatibilité entre le niveau d'exigence du fonctionnement optimal de ces logements et l'expression des besoins quotidiens des ménages¹⁴. Les logiques professionnelles et individuelles doivent trouver un compromis entre un idéal technologique et une performance résiliente aux usages et aux besoins de ses habitants.

On se rend compte que de l'approche holiste, technologique et macroéconomique des enjeux de transition énergétique bas-carbone dans le logement, naît une distorsion avec l'approche comportementale liée à l'analyse du comportement et des choix des ménages dans leur logement. Dans l'expression même des objectifs en matière de consommation d'énergie on saisit l'écart et la difficile conciliation entre (i) les objectifs macroéconomiques exprimés en kWh/m²/an sous la contrainte de l'enveloppe thermique du bâtiment (U) et (ii) les objectifs individuels exprimés en temps de vie et de confort dans le logement sous contrainte budgétaire (€). C'est ici tout l'enjeu de savoir comment consomment les ménages dans leur logement.

¹⁴ Une expérience test a montré que l'étanchéité des murs des logements BBC et BEPOS était compromise lorsque les ménages décidaient d'accrocher leurs tableaux au mur ou d'aérer leur pièce plus souvent que recommandé et/ou pour supplanter le système d'aération optimisé et intégré au bâti.

La relation entre performance et consommation énergétique dans le logement va être le résultat d'un arbitrage entre la qualité et le coût des services énergétiques disponibles dans les logements, une contrainte budgétaire globale (soit une part du budget des ménages allouée aux dépenses en énergie) et le niveau de service énergétique désiré par les ménages (Figure 4). Il existe deux niveaux de service énergétique dans le logement : un niveau de services dit de base commun à tous les ménages et sans lesquels le ménage tomberait dans la précarité (protection contre les intempéries et le froid, capacité à fournir l'eau courante et de cuisiner un repas chaud, etc.) et un niveau de services de confort, propre à chaque ménage car dépendant de ses caractéristiques, préférences et modes de vie (température de chauffage des pièces à vivre, fourniture d'électricité pour l'électronique et l'électroménager, service de climatisation, etc.).

FIGURE 4. ARBITRAGES MICROECONOMIQUES DES MENAGES DANS LEUR LOGEMENT : LE



SOURCE : AUTEUR

On voit ainsi pourquoi il est difficile de mesurer avec précision et certitude la rentabilité ex-post en matière d'économies d'énergies d'un projet de rénovation énergétique pour le logement résidentiel. En effet, finalement les gains énergétiques dépendent avant tout du comportement des ménages dans le logement et de la satisfaction de leurs besoins en matière de service énergétique, en particulier celui du confort thermique. Si un logement mal isolé, peu performant énergétiquement est rénové, son niveau de consommation énergétique post-travaux va avant tout dépendre de la façon dont les ménages vont arbitrer les gains de performance : choisiront-ils de les convertir en davantage de confort (et donc une consommation supérieure) ou bien en une économie monétaire qui viendra accroître leur pouvoir d'achat discrétionnaire ? Ce phénomène d'effet rebond est un enjeu crucial pour apprécier la réalisation d'économies d'énergie. Il est

propre à chaque ménage car il résulte de leur système de préférence, mais peut être évalué par des méthodes statistiques de typologie et de segmentation. Le premier chapitre de cette thèse propose ainsi une méthode empruntée aux sciences des organisations et du marketing stratégique, et dresse une typologie des dépenses des ménages dans leur logement. Cette approche originale permet de proposer une lecture structurée des objectifs de transition énergétique dans le logement et des leviers d'action à la fois publics et privés selon la position des groupes de ménages dans un cadran consommations énergétiques/revenus. En effet, une analyse de la typologie des ménages et de leurs dépenses d'énergie dans leur logement suggère qu'il existe des groupes de ménages plus ou moins appétant — suivant leurs revenus mais aussi leurs besoins en services énergétiques — à des mesures d'incitations qui ressortent d'outils de marché (véhicules financiers dédiés) ou encore d'avantages fiscaux, ou enfin d'une intervention publique qui peut agir sur la qualité du logement ou sur le niveau de revenu du ménage.

3.2. Chapitre 2

L'amélioration de la performance énergétique du parc de logement privé est une étape primordiale, et déjà très ambitieuse, de la transition énergétique bas-carbone en France. C'est le point de départ des recherches qui ont structuré et motivé le deuxième chapitre de cette thèse.

Pour améliorer la performance énergétique du secteur résidentiel et consommer moins d'énergie pour le même niveau de service énergétique, deux types de marchés s'offrent à nous : le marché du neuf et de la construction et le marché de l'ancien et de la rénovation. Le marché du neuf est régi par des normes de qualité, de consommation et de confort minimales. Les réglementations thermiques (ou RT) mises en place dès 1975 (RT74) à la suite du premier choc pétrolier ont progressivement évolué vers des exigences de performance de plus en plus fortes. Le niveau maximal de consommation énergétique a été divisé par près de 4 entre la RT74 et la RT2012 qui impose à toute construction réalisée à partir du 1er janvier 2013, un maximum de consommation de 50 kWh par m² et par an. Cela équivaut à l'obtention du label BBC, Bâtiment basse consommation, et à une étiquette A ou B+ après un Diagnostic de performance énergétique (DPE)¹⁵. La RT2020 qui lui succèdera aura une exigence encore plus forte allant jusqu'à l'objectif d'un bâtiment à consommation énergétique nette proche de zéro : ce sont les BEPOS. Si l'on considère que les constructions à partir de 2013 ont été réalisées en suivant la RT2012¹⁶, ont été

¹⁵ Par souci d'équité en matière de diversité de climat, la consommation minimale d'un bâtiment permettant d'obtenir le label BBC est pondérée en fonction de la localisation géographique (zone climatique) et de l'altitude du logement.

¹⁶ Ce qui est une hypothèse loin d'être vérifiée car l'obligation d'appliquer la réglementation aux constructions neuves à partir du 1^{er} janvier 2013 comporte des exceptions, exemptions et manquements.

construits depuis 2013 un volume total estimé à 1,372 millions de logements neufs labellisés BBC à fin 2016. Cela représente 5% du stock de 29 millions de logements. Par extrapolation, on voit que le retard de performance sera principalement localisé dans le logement individuel privé, beaucoup moins dynamique que le logement collectif en termes de construction « neuf ». A nombre de logements inchangé (ce qui est une hypothèse de départ fautive car on a vu que le nombre de logements a augmenté de 1% par an entre 2000 et 2013) il faudrait attendre 2070 pour que les nouvelles constructions BBC remplacent l'ensemble du parc existant (calculs de l'auteur).

Le marché a donc besoin de l'impulsion du marché de l'ancien et de la rénovation pour augmenter significativement la performance du stock de logements existant. Afin de répondre à cet enjeu, la France s'est donné pour objectif de rénover au moins 500 000 logements par an à partir de 2017 à raison de 380 000 logements privés, dont 50 000 logements occupés par des habitants en situation de précarité énergétique, et 120 000 logements sociaux (MEDDE). Si ce rythme est maintenu, on peut espérer un renouvellement total du parc de logement existant d'ici à 2050. Or, et c'est un phénomène constaté en France comme en Allemagne, il se révèle difficile et coûteux de stimuler et dépasser le rythme naturel de 100 000 à 200 000 rénovations fortes par an. Le DPE, lancé en 2007 et obligatoire pour toute transaction depuis 2011 permet de fournir une information qualitative sur la performance énergétique d'un logement grâce à une note allant de A pour les logements très performants à G pour les logements très énergivores. L'enquête Phebus (Insee et SOeS) réalisée en 2013 nous révèle qu'une grande majorité du parc (plus de 65 %) est encore classée en dessous de C (Table 1).

TABLE 1. PERFORMANCE DU PARC RESIDENTIEL EN FRANCE EN 2013

	AB 50-90 kWhep¹⁷/m² /an	C 91-150 kWhep/m² /an	D 151-230 kWhep/m² /an	E 230-330 kWhep/m² /an	F 330-450 kWhep/m² /an	G >450 kWhep/m² /an
Part	1,50%	7%	15%	29,50%	20%	27%
Nombre de logements	406 956	1 899 128	4 069 561	8 003 470	5 426 081	7 325 210

SOURCE : ENQUETE PHEBUS 2013

De par les effets de renouvellement chronologique du parc, il s'avère que la performance énergétique des logements (et leur note de DPE correspondante) est mécaniquement associée à la période de construction. En effet, le progrès technique du secteur, et les réglementations

¹⁷. kwep: consommation annuelle en kilowatt/heure équivalent pétrole par m² et par an.

thermiques successives depuis 1975 ont échelonné la performance énergétique du parc de logement. L'objectif affiché du gouvernement français est de parvenir à la rénovation complète des logements très énergivores (consommant plus de 300 kWh/tep/m²/an soit labellisés F et G au DPE) d'ici à 2025. En 2013, le parc résidentiel comporte plus de 12,5 millions de logements énergivores (F et G) dont la large majorité (près de 8 millions) est constituée des logements construits avant 1975 et de maisons individuelles. Cela représente plus de 45 % du parc de logements en France métropolitaine. Si le marché de la construction conserve son dynamisme tendanciel (soit un renouvellement de près de 1% par an), ce ne sont pas 500 000, mais 800 000 logements qui devront être rénovés d'ici à 2025 pour atteindre cet objectif (calculs de l'auteur).

Pour cela, il faut lever les barrières et les freins liés à l'investissement dans la rénovation énergétique privée¹⁸. Le **chapitre 2** se focalise ainsi sur le problème de l'investissement privé dans l'efficacité énergétique dans le logement. Après avoir identifié les principaux freins à l'investissement, qui relèvent du concept dit du paradoxe énergétique, nous allons vérifier l'hypothèse de la présence d'une valeur verte sur le marché privé du logement à travers une méthode novatrice d'évaluation des prix de l'immobilier sur un marché local (celui de la communauté urbaine de Dijon). Ce chapitre contribue à la littérature très riche des modèles de prix sur le marché de l'immobilier de par sa méthode d'évaluation des prix par une fonction frontière. Ces modèles d'optimisation mathématique s'extraient du cadre de la méthode des prix hédoniques (Rosen, 1974) et des hypothèses rigides des approches paramétriques (Fuerst et al., 2015 ; Hyland et al., 2013 ; Cajias et Piazzolo, 2012 ; DG Energy, 2011 ; Brounen et Kok, 2011 ; Filippidou et al., 2016 ; Kahn et Kok, 2014) en proposant un modèle de formation des prix qui intègre les dynamiques d'un marché local et permettent l'évaluation monétaire de caractéristiques à la fois quantitatives, spatiales et qualitatives. Ainsi, nous avons pu évaluer les écarts de prix que peut entraîner l'attribution d'étiquettes de performance énergétique et en déduire une valeur patrimoniale à la qualité énergétique du logement. Ce chapitre comprend également une évaluation en termes de coûts/bénéfices du poids de cette valeur verte par rapport à l'investissement initial afin de lever les barrières informationnelles qui peuvent exister sur ce marché.

¹⁸ Le financement de la performance énergétique du parc social obéit à une dynamique et à des outils de financement très différents que pour le logement privé. Tout en prenant compte des relations en termes de prix et de performance entre les logements du parc public et du parc privé, cette thèse se penche avant tout sur le logement privé et n'aborde pas la question du logement social.

3.3. Chapitre 3

Comme ont pu le montrer les travaux de (Bénabou, 2009), lorsque l'acceptation de la réalité conduit à des pertes conséquentes et une destruction collective assurée¹⁹, l'individu est rationnellement poussé vers la construction d'un équilibre basé sur le déni collectif. Ce type de dynamique peut soutenir la survalorisation des actifs qui soutiennent un système productif basé sur les énergies fossiles, en contradiction avec un monde qui décide de limiter le réchauffement climatique à moins de 2°. Cette bulle carbone, mentionnée comme telle en premier lieu dans les rapports de l'initiative de Carbon Tracker (Leaton et al. 2013) peut rester vivace tant que la valeur sociale du carbone ne sera pas intégrée dans les choix de mode de production et de développement de nos sociétés et au sein même des structures de marché qui les sous-tendent : marchés productifs et marchés financiers. Pour cela, il faut que ceux-ci réalisent, s'approprient et se mobilisent dans la lutte contre le changement climatique. Les travaux menés dans ce dernier chapitre de thèse se veulent plutôt optimistes quant aux dynamiques actuelles d'élévation des consciences environnementales et la prise en compte des enjeux climatiques par les acteurs économiques et financiers. La prochaine révolution, qu'elle soit technologique, régaliennne ou organisationnelle, se fera sur le terrain de la finance. Les marchés et les entreprises intègrent peu à peu les enjeux climatiques dans leurs stratégies de développement, en dehors de toute considération altruiste ou de sensibilité environnementale, révélant peut-être la fin du déni collectif et une capacité des acteurs à apprendre des erreurs commises dans le passé.

La mobilisation du secteur financier privé pour les enjeux environnementaux et climatiques s'est matérialisée en trois évènements majeurs.

Le premier fut le Sommet de l'Organisation des Nations Unies sur le climat tenu à New York en septembre 2014. Sous l'impulsion du secrétaire de l'ONU Ban Ki Moon, les acteurs internationaux publics, mais aussi et surtout des acteurs privés de la société civile et du secteur financier se sont penchés sur une phase d'action et d'accélération de l'intégration des enjeux climatiques au sein des marchés financiers. De ce sommet est né le Montreal Carbon Pledge, premier groupement d'envergure qui est parvenu à réunir plus de 120 d'investisseurs mondiaux (soit un stock d'actifs en gérance de plus de 10 000 milliards d'€) qui s'engagent à respecter des principes d'investissement responsable (*PRI-Principle for Responsible Investments*).

¹⁹ Principe de MAD : « Mutually Assured Destruction »

Le second fut le *Climate Finance Day* organisé à Paris en mai 2015, qui a vu l'implication grandissante de grands acteurs de la finance et des prises de positions fortes en matière de lutte contre le changement climatique. Un hasard du calendrier a voulu que le même jour, soit voté l'amendement à l'article 173 de la Loi de Transition Énergétique pour une Croissance Verte qui propulse la France en exemple et laboratoire réglementaire de l'intégration des enjeux climatiques au sein du secteur financier et bancaire.

Enfin, la tenue de la COP 21 à Paris en décembre 2015, dont la réussite a permis d'aboutir à l'Accord de Paris, est une confirmation de l'appropriation et de l'officialisation des questions climatiques à l'échelle mondiale et au sein de la sphère privée. C'est au moment de la COP 21 que se sont lancées diverses initiatives de grande importance : crée par le G20, le *Financial Stability Board* (FSB) sous l'impulsion de son directeur Mark Carney, fonde un groupe de travail pionnier sur la divulgation des informations financières liées aux risques climatiques : la TCFD (*Task Force on Climate Related Financial Disclosure*). Au même moment, furent inaugurés des comités d'expertise dédiés au sein des différentes institutions décisionnaires : la formation d'un comité d'experts à la Commission Européenne et de la *Green Finance Study Group* au G20. Ce dernier, depuis, forme un socle d'expertises académiques et professionnelles qui préfigure de l'importance des échanges que doivent employer ces deux mondes pour appréhender le sujet complexe des **enjeux de la transition énergétique pour le secteur financier privé. Cette question peut également se poser autrement : la valeur sociale du carbone peut-elle être générée sur les marchés financiers ?**

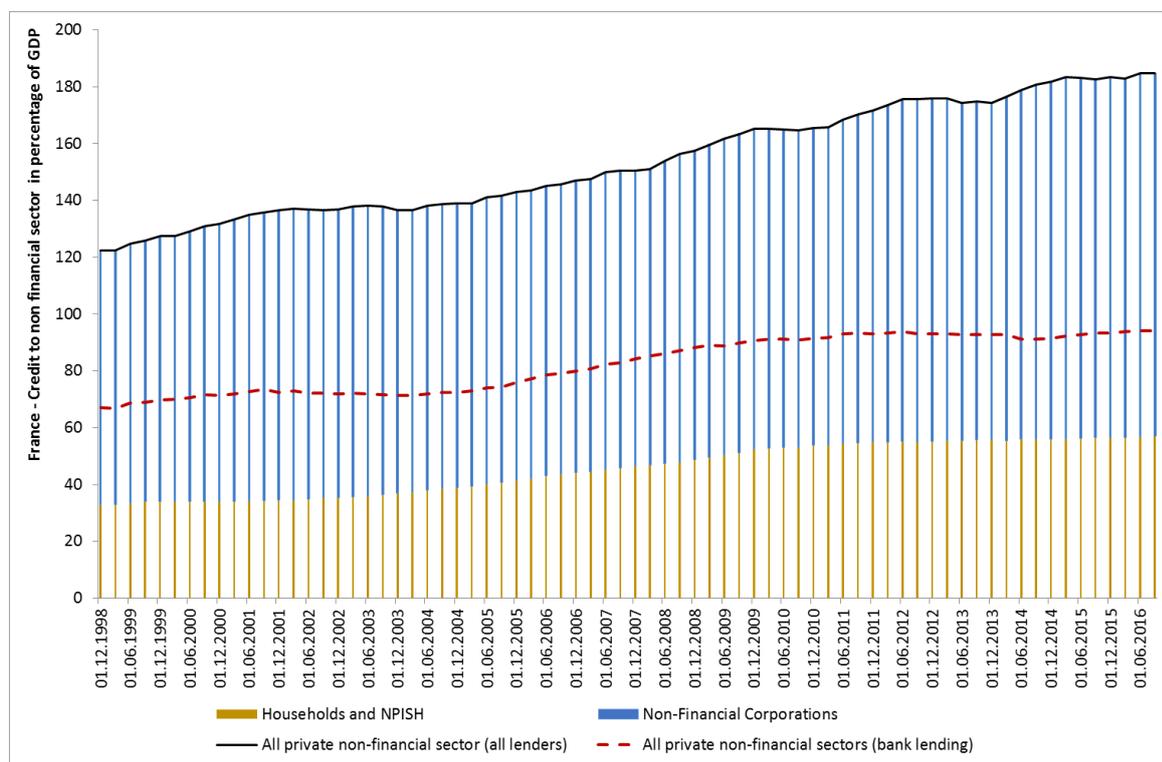
La création d'une valeur carbone est une étape nécessaire à l'intégration des externalités négatives contributives au changement climatique et retardant la transition énergétique. La valeur sociale du carbone peut se comprendre comme la valeur accordée en matière de « bien-être » d'une tonne de carbone non émise. C'est une valeur « internalisée » accordée à une croissance optimale qui ne peut être atteinte s'il subsiste des déséquilibres liés à la dégradation du climat. Ces déséquilibres sont donc une « externalité » qu'il faut « internaliser » dans le calcul économique. En France, les premiers travaux de ce genre proviennent du « rapport Quinet » qui émet l'un des premiers appels à la création d'une valeur carbone, appelée alors « valeur tutélaire du carbone ».

Pour prendre en compte ces externalités négatives de pollution et d'émission de gaz à effet de serre, la première modalité est une intervention de la régulation et d'édition d'un prix du carbone exogène explicite (mise en place d'une taxe ou d'un marché de permis) ou implicite (établissement de normes et de standards visant à orienter le marché vers des technologies énergétiques bas-

carbone). La création d'une valeur carbone par l'intégration des risques liés aux enjeux climatiques dans la formation des prix de marché par le principe de « porteur de risque payeur » semble d'avantage convenir aux enjeux pratiques et aux développements actuels de la relation entre finance et climat. Les acteurs du système financier mondial sont aujourd'hui confrontés à une nouvelle famille de risques : les risques physiques (liés à la résurgence des phénomènes climatiques extrêmes), les risques induits, dits de transition (liés à la valeur sociale du carbone et son implémentation dans les stratégies politiques et économique à venir), les risques macroéconomiques (impact de la transformation des secteurs) et les risques technologiques (liés à la forme de la trajectoire de technologies bas-carbone). L'intégration de ces risques permet d'évaluer l'empreinte carbone des activités financières et de générer un signal prix du carbone interne aux marchés des capitaux et de la dette. La valeur sociale du carbone peut donc également prendre la forme d'un prix explicite ou implicite, endogène aux marchés sous la forme d'une prime de risque. Afin que les marchés et les institutions parviennent à identifier, mesurer et intégrer ce risque dans la conduite de leurs activités d'investissement, de financement et de couverture, il est impératif que acteurs financiers (i) accèdent aux connaissances liées aux risques climatiques, (ii) mettent en œuvre des outils de mesure de leur empreinte et de leur exposition carbone, et enfin (iii) disposent de marges de manœuvre nécessaires pour implémenter une transition énergétique. Ce chapitre s'applique donc à identifier, préciser et proposer une manière de lever tour à tour ces trois verrous.

Il s'intéresse tout particulièrement au rôle du secteur bancaire dans la conduite d'une transition énergétique bas-carbone. En effet, les pays membres de l'Union européenne sont inscrits dans un cadre spécifique où ils doivent répondre de critères très exigeants à la fois sur leurs politiques budgétaires (critères de Maastricht) et sur leur politique monétaire (octroi du pouvoir de création monétaire à une autorité indépendante : la Banque centrale européenne (BCE)). Ce transfert de souveraineté, au profit de plus d'intégration, de stabilité et de convergence économique, implique que les investissements durables vont devoir tout autant provenir de la sphère privée que de la sphère publique. La massification des marchés de la transition énergétique nécessite l'intervention d'intermédiaires financiers. Ce sont eux qui, en particulier en Europe, financent la majeure partie de l'économie réelle autrement dit les entreprises et les ménages. En France, les banques financent plus de la moitié des agents du secteur privé à hauteur d'une part équivalent au PIB (95%) (Figure 5).

FIGURE 5. POIDS DES CREDITS AU SECTEUR NON FINANCIER PRIVE AU PIB FRANÇAIS



SOURCE: DONNEES BIS « CREDIT TO THE PRIVATE SECTOR »

NOTES: LES AIRES REPRESENTENT LE VOLUME DE PRETS ACCORDES AUX AGENTS NON-FINANCIER DE LA PART DE L'ENSEMBLE DES INSTITUTIONS FINANCIERES (BANQUES ET NON-BANQUES), LA LIGNE POINTILLEE REPRESENTE L'ENSEMBLE DES PRETS ACCORDES AUX AGENTS NON FINANCIERS PRIVES (HORS INSTITUTIONS FINANCIERES ET GOUVERNEMENT) PAR LES INTERMEDIAIRE FINANCIERS BANCAIRES.

C'est donc en majeure partie aux banques de résoudre la question de la massification de la transition énergétique bas-carbone. La résolution du troisième verrou énoncé plus haut revient ainsi, dans le cas de l'Europe et en particulier en France, à poser la question suivante : **en quoi les banques sont-elles les mieux placées pour valoriser et financer la transition énergétique, et comment susciter leur intérêt à ce sujet?**

La première section du chapitre se penche sur l'identification, la transmission et la mesure des risques climatiques au secteur financier et, en particulier, le secteur bancaire en distinguant trois types de risques climatiques : les risques physiques, les risques de transition et les risques fiduciaires et de réputation. L'attention a été portée sur la transmission de ces risques à la sphère bancaire et aux risques finaux du secteur : risques opérationnels, risques de crédit, risques de marchés. L'objectif de cette partie est ensuite d'établir un état des lieux des outils de mesure des risques climatiques ainsi que leurs limites et propose des pistes pour enrichir les pratiques

actuelles. La seconde section du chapitre se penche finalement sur le rôle des autorités de régulation du secteur financier et bancaire et de leurs pratiques d'internalisation des risques climatiques, notamment lorsqu'ils revêtent un caractère systémique. L'élaboration de ce dernier chapitre s'est réalisée dans un contexte réglementaire « brûlant ». Pour répondre à ces questions, la LTECV comporte aussi un élément d'envergure mondiale en matière réglementaire contenu dans son article 173 grâce auquel la France est le premier pays à intégrer les enjeux environnementaux aussi profondément au sein du cadre réglementaire bancaire et financier. L'article amorce un changement de stratégie quant à l'intégration des risques climatiques dans l'activité même des institutions financières. La loi agit sur deux points qui se veulent performatifs : la transparence et l'internalisation des risques. Les travaux menés dans le dernier chapitre proposent également une lecture de ces deux points et de ses chances de réalisation du point de vue d'une structure bancaire.

4. References

Bénabou, R., 2009. Groupthink: Collective Delusions in Organizations and Markets (Working Paper No. 14764). National Bureau of Economic Research. doi:10.3386/w14764

Breaking the tragedy of the horizon - climate change and financial stability - speech by Mark Carney | Bank of England, 2015. . Bank of England.

Brounen, D., Kok, N., 2011. On the economics of energy labels in the housing market. *Journal of Environmental Economics and Management* 62, 166–179. doi:10.1016/j.jeem.2010.11.006

Cajias, M., Piazzolo, D., 2012. Green Performs Better: Energy Efficiency and Financial Return on Buildings (SSRN Scholarly Paper No. ID 2186036). Social Science Research Network, Rochester, NY.

Carbon Tracker, n.d. Wasted capital and Stranded Assets [WWW Document]. URL <http://www.carbontracker.org/report/unburnable-carbon-wasted-capital-and-stranded-assets/> (accessed 12.2.16).

Chevalier, J.-M., Derdevet, M., Geoffron, P., 2012. *L’avenir énergétique : cartes sur table*. Gallimard, Paris.

Convention-Cadre sur les changements climatiques, 2015.

Cramton, P., Ockenfels, A., Stoft, S., 2015. An International Carbon-Price Commitment Promotes Cooperation. *Economics of Energy & Environmental Policy* 4. doi:10.5547/2160-5890.4.2.aock

Criqui, P., Mima, S., 2012. European climate—energy security nexus: A model based scenario analysis. *Energy Policy, Modeling Transport (Energy) Demand and Policies* 41, 827–842. doi:10.1016/j.enpol.2011.11.061

Dasgupta, D., Espagne, E., Hourcade, J.-C., Minzer, I., Nafu, S., Perissin-Fabert, B., Robins, N., Sirkis, A., 2016. Did the Paris Agreement Plant the Seeds of a Climate Consistent International Financial Regime? (MITP: Mitigation, Innovation, and Transformation Pathways No. 243151). Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM).

Décret n° 2015-1491 du 18 novembre 2015 relatif aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone, 2015. , 2015-1491.

Espagne, E., 2015. Les clubs climatique et la COP21 : ennemis d’aujourd’hui et alliés de demain? *La Lettre du CEPIL*.

European Commission; DG Energy, 2011. Energy Performance Certificates in Buildings and Their Impact on Transaction Prices and Rents in Selected EU Countries [WWW Document]. Building Rating. URL <http://www.buildingrating.org/document/energy-performance-certificates-buildings-and-their-impact-transaction-prices-and-rents> (accessed 7.29.16).

Filippidou, F., Nieboer, N., Visscher, H., 2016. Energy efficiency measures implemented in the Dutch non-profit housing sector. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2016.05.095

Fuerst, F., McAllister, P., Nanda, A., Wyatt, P., 2015. Does energy efficiency matter to home-buyers? An investigation of EPC ratings and transaction prices in England. *Energy Economics* 48, 145–156. doi:10.1016/j.eneco.2014.12.012

Gollier, C., Tirole, J., 2015. Negotiating effective institutions against climate change. *Economics of Energy & Environmental Policy* 4. doi:10.5547/2160-5890.4.2.cgol

Goupil, C., 2009. Thermodynamics of the thermoelectric potential. *Journal of Applied Physics* 106, 104907. doi:10.1063/1.3257250

Goupil, C., Herbert, Eric, D'Angelo, Yves, 2016. Efficace ou optimal : quand les usages s'en mêlent. Presented at the Evolution du paysage urbain parisien au prisme des risques climatiques, DyCo, LIED, UMR 8236, Université Paris Diderot, Paris.

Griffin, P.A., Jaffe, A.M., Lont, D.H., Dominguez-Faus, R., 2015. Science and the stock market: Investors' recognition of unburnable carbon. *Energy Economics* 52, 1–12. doi:10.1016/j.eneco.2015.08.028

Hyland, M., Lyons, R.C., Lyons, S., 2013. The value of domestic building energy efficiency — evidence from Ireland. *Energy Economics* 40, 943–952. doi:10.1016/j.eneco.2013.07.020

IPCC, 2014. Fifth Assessment Report - Synthesis Report (Synthesis Report No. AR5). IPCC.

Kahn, M.E., Kok, N., 2014. The capitalization of green labels in the California housing market. *Regional Science and Urban Economics*, SI: Tribute to John Quigley 47, 25–34. doi:10.1016/j.regsciurbeco.2013.07.001

King, D., Arunabha Ghosh, Daniel Shrag, 2015. Climate Change - A risk assesement, Centre for Science and Policy. University Of Cambridge.

Leaton, James, Ward, Bob, 2013. Unburnable Carbon 2013: Wasted capital and stranded assets.

McGlade, C., Ekins, P., 2015. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C. *Nature* 517, 187–190. doi:10.1038/nature14016

- Nordhaus, W., 2015. Climate Clubs: Overcoming Free-Riding in International Climate Policy. *American Economic Review* 105, 1339–1370. doi:10.1257/aer.15000001
- Pottier, A., 2014. L'économie dans l'impasse climatique. École polytechnique.
- Rosen, S., 1974. Hedonic Prices and Implicit Markets: Product Differentiation in Pure Competition. *Journal of Political Economy* 82, 34–55.
- Samuelson, P.A., 1954. The Pure Theory of Public Expenditure. *The Review of Economics and Statistics* 36, 387–389. doi:10.2307/1925895
- Sorrell, S., 2009. Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy Policy* 37, 1456–1469. doi:10.1016/j.enpol.2008.12.003
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J., 2008. The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics* 65, 636–649. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.08.013
- Spedding, P., Mehta, K., Robins, N., 2013. Oil & carbon revisited. Europe.
- Stern, N., 2016. Economics: Current climate models are grossly misleading. *Nature News* 530, 407. doi:10.1038/530407a
- Stern, N., 2013. The Structure of Economic Modeling of the Potential Impacts of Climate Change: Grafting Gross Underestimation of Risk onto Already Narrow Science Models. *Journal of Economic Literature* 51, 838–59. doi:10.1257/jel.51.3.838
- Stiglitz, J.E., 2015. Overcoming the Copenhagen Failure with Flexible Commitments. *Economics of Energy & Environmental Policy* 4. doi:10.5547/2160-5890.4.2.jsti
- Umbach, F., 2010. Global energy security and the implications for the EU. *Energy Policy* 38, 1229–1240. doi:10.1016/j.enpol.2009.01.010
- Weitzman, M.L., 2015. Internalizing the Climate Externality: Can a Uniform Price Commitment Help? *Economics of Energy & Environmental Policy* 4. doi:10.5547/2160-5890.4.2.mwei

CHAPTER 1. UNDERSTANDING ENERGY CONSUMPTION IN THE FRENCH HOUSING MARKET

This chapter is based on a paper jointly written with Emmanuel Hache and Valérie Mignon, titled “Beyond Average Energy Consumption in the French residential housing market: A household classification approach”. The paper is published in Energy Policy 107 (2017).

Research question and results have been illustrated by a poster presented in June 2016 at the 39th IAEE International conference in Bergen at NHH (Norwegian School of Economics). The paper has been presented and discussed at the ICABE conference in September 2015 held at University Paris Ouest Nanterre la Defense.

Abstract

In a new environment marked by the growing importance of Green House Gas emissions, fuel poverty, and energy efficiency in the different national agendas, the comprehension of energy demand factors appears to be crucial for the effectiveness of energy policies. We consider the latter could be improved by targeting specific household groups rather than looking to follow a single energy consumption level target. This chapter explores the scope of having a disaggregated energy consumption market to design policies aimed at curbing residential energy consumption or lowering its carbon intensity. Using a clustering method based on the CHAID (Chi Square Automatic Interaction Detection) methodology, we find that the different levels of energy consumption in the French residential sector are related to socio-economic, dwelling and regional characteristics. Then, we build a typology of energy-consuming households where targeted groups (fuel poor, high income and high consuming households) are clearly and separately identified through a simple and transparent set of characteristics. This classification represents an efficient tool for energy efficiency programs and energy poverty policies, but also for potential investors, which could provide specific and tailor made financial tools for the different consumer groups. Furthermore, our approach helps designing some energy efficiency score that could reduce the rebound effect uncertainty for each identified household group.

1. Introduction

The tertiary sector, which includes the residential sector, represents about 44.9% of global energy consumption in France, and 21% of CO₂ emissions in 2015. This sector consumes more energy than any other sector in the country (33.1% for transport, 19% for industry, and 3% for agriculture). Within this sector, the residential part accounts for 67% (i.e., 30.2% of final energy consumption).²⁰ The residential sector is then considered as a key driver for energy efficiency programs—such as insulation—and more generally for energy policy. Despite this major role, energy efficiency policy measures have been either designed to fit an average national target or restricted to a small portion of the population. In France, energy efficiency social benefit programs exist for modest landlords in old dwellings (National Housing Agency programs), but there is no specific policy devoted to other income groups. Instead, wide-ranging policies, such as subvention programs (zero interest rate loans) or tax cuts (tax credit for sustainable development and energy transition), are favored as they tend to be a sensitive argument for wealthier households and trigger investment decisions. However, they are very expensive and, as argued by Charlier (2015) and Nauleau (2015), they suffer from a misuse in public spending as they carry away detrimental windfall effects.

Energy consumption in private houses stems from three main usages: space heating (61.3% of the total expenditures), hot water and cooking (19.1%), and specific electricity use²¹ (19.5%).²² Moreover, the promotion for energy efficiency in residential buildings is mainly based on conventional and modeled consumption,²³ which does not thoroughly and narrowly account for household characteristics and effective behaviors—yet, those are necessary in order to offer a comparable set of energy efficiency measures on buildings.

²⁰ French Ministry of Environment and Energy : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2669/966/chiffres-cles-lenergie-edition-2016.html>

²¹ This usage is growing at a very high rate as households and houses are more and more connected, and the appliances evolve toward high technology and multimedia services.

²² Data are from the Cerema (French center for studies and expertise on risks, environment, mobility and development) for the year 2013 (<http://reseaux-chaleur.cerema.fr/consommation-denergie-dans-les-batiments-chiffres-cles-2013>).

²³ See French Environment and Energy Management Agency.

TABLE 2. HOUSEHOLDS ENERGY EXPENDITURES AND EFFORT RATES IN FRANCE IN 2013

	Energy Mix	Observation number	Median Energy annual expenditures	Median Annual global income	Median Energy budget share	Median Energy expenditures per person
Houses	Electricity heated	2 943	1 460,00 €	36 650,00 €	4,0%	5,8 €
	Mixed gas heated	3 737	1 737,00 €	36 303,00 €	4,8%	7,5 €
	Unconventional	8 132	1 800,00 €	34 447,00 €	5,0%	7,1 €
	Median houses	14 812	1 701,00 €	35 285,00 €	4,8%	7,0 €
Flats	Electricity heated	5 355	613,00 €	23 124,00 €	2,6%	6,3 €
	Mixed gas heated	4 662	803,50 €	23 693,50 €	3,3%	6,1 €
	Unconventional	1 175	897,00 €	20 589,00 €	4,1%	7,0 €
	Median flats	11 192	720,00 €	23 042,50 €	3,1%	6,3 €
Total Average		26 004	1 280,00 €	29 595,00 €	4,13%	7,1 €

SOURCE: INSEE NATIONAL HOUSING SURVEY 2013; OWN CALCULUS

A cross-tabulated analysis enlightens us on the heterogeneity and variability of French households' energy consumption given dwelling types, but also income and energy mix. Energy expenditures increase greatly when households live in individual houses rather than in collective dwellings (Table 2). Indeed, in the case of houses, the level of the annual energy bill is more than doubled, and both the energy budget share and the energy bill weighted per m² and per inhabitant are increased by respectively 70ct€ and 1.7% compared to collective dwellings.

Moreover, energy expenditures and budget shares also vary within each dwelling type according to the energy mix. For example, the energy bill in flats (houses) is 45% (23%) more expensive when households consume a mix of alternative fuels such as butane, domestic fuel, coal or wood rather than an exclusive electric mix—the corresponding budget share being 1.4 pp. (1 pp.) higher. Furthermore, it is also worth noticing that households which use unconventional fuels are between 5% (in houses) and 15% (in flats) poorer than other households on median.

In this chapter, our aim is to address specifically the question of heterogeneity in energy residential demand in France, and to identify the factors that explain the gap between expected and realized energy final consumption levels. To this end, we go beyond the average household energy consumption prism as our originality is to rely on a disaggregated-level analysis. We rely on a clustering approach—the Chi Square Automatic Interaction Detection (CHAID) approach—allowing us to propose a detailed typology of households based on a transparent set of characteristics identified by the existing literature and traditional methods. Disaggregated approach allows three types of analysis: typology, market segmentation and the computation of a distortion score. Each of them enlightens respectively three issues in a new perspective: fuel poverty, energy policies' scope and utility and the uncertainty caused by some unknown rebound effect. The typology proposes a new reading for the measures and indicators of fuel poverty in residential housing. Disaggregated approach facilitates the segmentation of the residential energy efficiency policies given their group target (fuel-poor households or prospects for energy efficiency investments) and their dedicated tools (social benefits, fiscal nudges, zero-rate loans...). Finally the rebound-effect uncertainty is circled down by computing a group-specific distortion score that is the synthesis of the intensity and revenue factors.

The chapter is organized as follows. Section 2 briefly reviews the existing literature on empirical approaches to model energy demand and especially the rebound effect. In this section we especially address the importance of household heterogeneity and the need to propose a disaggregated energy demand analysis. Cluster and decision tree methodology is then described in Section 3. Section 4 presents the data we used as well as the selection process of the heterogeneity factors that will feed our cluster analysis. Our main results and comments including typology, market segmentation and group-specific distortion scores are presented in Section 5. Section 6 summarizes our findings and provides policy recommendations.

2. Literature review on empirical approaches to measure energy demand and rebound effect

2.1. Energy demand income and price elasticities

Relationship between demand and prices and income is in microeconomics described by elasticities. Price elasticity measures the variation in demand of a specific good when its price (for direct elasticity) or the price for another good (indirect elasticity) varies. Note that demand for a given good is elastic to price change (direct or crossed) provided that some substitutes exist for the

given good. In the case of energy demand, it means that household can change primary energy source (switch from fuel to wood or from electricity to gas to heat their homes) or change their energy usage and switch energy services (take shower instead of baths or put on a sweater). Time is also of the essence as substitutes are more or less immediate to implement. In the case for energy services, demand can be inelastic on the short term during the time of which households change their appliances or their heating system for example. Engel curve describes how a consumer's purchases of a good like food varies as the consumer's total resources such as income or total expenditures vary. Engel curves also depend on demographic variables and other consumer characteristics. It determines the income elasticity for a given set of goods, and hence allows us to classify it as inferior, normal, or luxury depending on whether the income elasticity is respectively negative, inferior to unity or greater than unity. Table 3 gives us a set of example and elasticity characteristics given the type of good.

TABLE 3. PRICE AND INCOME ELASTICITIES TAXONOMY AND EXAMPLE FOR THE ENERGY DEMAND

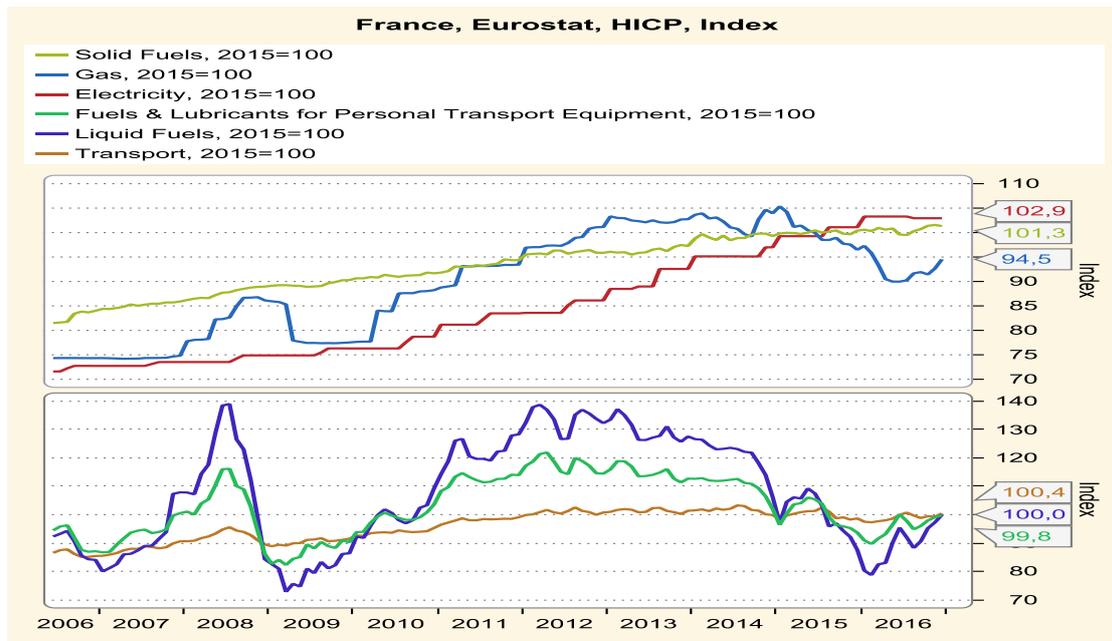
Price or income variation	Demand Variation	Type of good	Application to the energy demand
Direct price increase	Demand for good 1 decreases (negative elasticity)	Normal good	When gasoline price increases, people tend to travel less.
	Demand for good 1 increases (positive elasticity)	Either Giffen (Inferior but necessity good) or Veblen (symbolic or snobbism effect)	Veblen effect for holidays electric lights during winter or outside Jacuzzis on ski stations
Indirect price increase (price of good 2 increases)	Demand for good 1 increases	Goods 1 and 2 are complementary goods	Individual car and gasoline
	Demand for good 1 decreases	Goods 1 and 2 are substitutable goods	Heating fuel type : electricity and gas; coal fuel and wood
	Demand for good 1 is unchanged	Good 1 and 2 are independent	Can apply, to some extent, to some good that doesn't need energy to be used (ex. chocolate)
Income increases	Demand for good 1 increases less than proportionally	Good 1 is a normal good	People tend to heat larger homes when their income increase
	Demand for good 1 increases more than proportionally	Good 1 is a luxury good	People tend to multiply electricity specific appliances and luxury energy services (home cinema system)

	Demand for good 1 decreases	Good 1 is an inferior good	When households change their old washing machine or boiler.
Income decreases	Demand for good 1 is unchanged	Demand for good 1 is constrained/necessary /fixed	Heating a room adequately (at a healthy level)

SOURCE: AUTHORS

Prices elasticities in France have been difficult to measure as the main energy prices have been regulated and capped for several decades. Compared to transport fuels and gas, electricity prices have been relatively stable for 25 years as they have been regulated and capped for consumers until 2012 as shown in Figure 6. Electricity prices increased at increasing yet regular pace since 2010 and unlike gas prices, they haven't dropped in 2015.

FIGURE 6: ENERGY CONSUMER PRICE INDEX IN FRANCE



SOURCES: DATA END USE CONSUMER ENERGY PRICE INDEX IN FRANCE FROM 2006 TO 2016 (EUROSTAT)

2.2. Rebound effect uncertainty: definition, estimation methods and setbacks.

The “take-back”, or “rebound effect”,²⁴ refers to an increase in the supply of energy services, with a corresponding decrease in the effective price, the size of which depends upon the underlying cost

²⁴ The rebound effect—also called the “Jevons Paradox”—was highlighted in 1865 by William Stanley Jevons within his famous book, *The Call question*. This ecological paradox describes the unexpected consequences in terms of natural resources consumption resulting from a refinement of a technological process. Thereby, the implementation of an improved technology through a more efficient energy

structure (Greening et al., 2000). When energy efficiency measures do not account for the gap between expected and actual consumptions, they might face some rebound effect that has been observed in both the transportation and the residential sectors.

The rebound effect can take three forms—direct, indirect and economy-wide. Direct rebound effect refers to the increase in the use of the energy service that experienced a change in price and is usually measured with the own price elasticity of the energy service. Indirect rebound effect measures the increase in “sectoral” energy demand driven from the reallocation of the energy efficiency savings to other energy consuming goods and services. “Economy-wide” rebound effect captures the structural changes in the economy that comes from the new equilibrium between demand and price after an efficiency improvement. In this chapter, we canalize our interest on the direct rebound effect and how it creates a gap between modelled and realized energy demand for the consumption of a specific energy good and service that is the energy demand in homes for a specific household.

Literature on rebound effect is rich (see a literature review in (Greening et al., 2000) and (Sorrell and Dimitropoulos, 2008)). In an ideal situation, rebound effect is directly estimated from the elasticity of demand for energy services with respect to a change in energy efficiency. The lack of accuracy and availability of corresponding data is such that rebound effect is more often measured through the estimate of own-price elasticity of energy service (Khazzoom, 1980). Regarding space heating, that accounts for 70% of household energy total expenditures, estimated rebound effect in the economic literature ranges from 10% to 58% in the short term and from 1.4% to 60% in the long term (Sorrell and Dimitropoulos, 2008). We can see that the range of estimates of direct rebound effect is wide. Moreover, demand response to a change in price is often the result of a complex arbitrage that is very specific to each household but can be approached if we know the main factors of this heterogeneity (A. Greening et al., 2000).

Sorrell and Dimitropoulos (2008) argue that this method, whether it is used on cross-sectional or historical variation, can lead to errands in the estimation of the rebound. This overestimation is notably due to asymmetry in energy elasticities’ estimates and collinearity (Baker and Blundell, 1991) especially regarding income groups and tenure. Guertin et al. (2003) found that rebound effect after a variation in price is 5% lower after energy retrofits. As found by Madlener and

process can paradoxically lead to an increase in energy consumption. The widespread use of the technology, the decrease in incentives for the rationalization of energy consumption, the decrease in unit price for energy services and the revenue effect observed through energy efficiency gains can explain the rebound effect (Khazzoom, 1980).

Hauertmann in Germany, rebound is stronger for low income tenants than high income tenants (49% versus 31%) but in the case for owners, low income households exhibit slightly lower rebound than high income owners (13% versus 14%). In fact those findings are consistent with the idea that energy demand income path is “S” curved (Jamasp & Meier 2012) and goes from necessity to luxury good and therefore energy demand is stronger at very low and very high incomes. The difference in a household’s prevailing activities plays also a key role in influencing energy consumption. As we find evidence that income is crucial in determining energy consumption, we can deduce that the link between income and consumption goes through activity. An interesting related study is Wilke et al. (2013), which relies on a bottom-up stochastic model to predict residential building occupants’ time-dependent activities. They calibrate their model in the case of France (1998-1999 French time-use survey data) by considering three types of time-dependent activities. They show that the household income—in addition to other variables such as parental information and the employment status of the spouse/partner—has a major influence on residential occupants’ activities, in line with our findings regarding the link between income and energy consumption that passes through activity.

Being aware of these methodological problems, we go further from the previous literature and derive energy consumption from the classification of household groups. Group specification indeed overcomes the nonlinear and collinear relationship between demand and income, and provides a solid outline regarding shifts of the Engel curves²⁵ according to demographics and household groups.

2.3. Discrete choice modelling of energy expenditures

Studies that analyse energy consumption at an individual level basis are usually of three types: discrete, continuous, or conditional demand.²⁶ Another approach to energy demand modelling is to specify the average relationship between energy expenditures and households’ characteristics as nonlinear and assign an energy expenditure level probability to a homogenized household group where each agent within the group is supposed to have the same energy consumption level. Analysing the relationship between income and domestic fuel use, Druckman and Jackson (2008)

²⁵ The Engel curve describes how a consumer’s behavior in the purchases of a good (food, for instance) changes when said consumer experiences a variation in her/his total resources (income, expenditures). Engel curves may also depend on demographic variables and other consumer characteristics. A good’s Engel curve determines its income elasticity, and hence allows us to classify the good as inferior, normal, or luxurious depending on whether the income elasticity is respectively negative, inferior to unity or greater than unity.

²⁶ For discrete and continuous models, see Durbin and McFadden (1984) on US data, and Nesbakken (2001) on Norwegian data. Turning to the conditional demand approach, see Parti and Parti (1980) for the US; Baker et al. (1989), Meier and Rehdanz (2010) for the UK and Rehdanz (2007) for Germany.

compare the results for two levels of regional disaggregation (national and local) and different types of households by using the Local Area Resource Analysis (LARA) model. In this study, household groups' segmentation comes directly from the Output Area Classification constructed by Vickers and Rees (2007) based on geographic and socio-economic characteristics. They highlight the relevance of a disaggregated approach, evidencing many groups with specific energy consumption habits showing that: (i) households in cities spend the lowest proportion of disposable income on fuels, and (ii) "City Living" but also "Typical Traits and Prospering Suburbs" are groups that may be called "fuel rich" as they spend the lowest share of their income in fuel, their long-run price elasticity of demand being therefore inelastic. Following the same motivation and relying on a clustering method, the Centre for Sustainable Energy OFGEM program (2014) finds a total of 12 energy consumer archetypes regarding gas and electricity consumption for UK households in 2010 and 2014 with the following influencing characteristics: heating fuel, income, household type, region, tenure and urban density—the set of predictors differing for gas and electricity consumption.

Regarding the previous literature dealing with energy consumption, very few studies explore the energy demand response beyond the average household estimation. To the best of our knowledge, only three articles provide measures for the rebound effect according to different household groups: Murray (2013) for Australia, Thomas and Azevedo (2013) for the US, and Chitnis et al. (2014) for the UK. They all reach the same conclusions: (i) households react differently to a change in price from energy efficiency measures, and (ii) the direct rebound effect is inversely related to income. Moreover, Murray (2013) and Chitnis et al. (2014) find that the type of the rebound is different according to household groups. Whereas low-income households have a major propensity for direct rebound, high-income households tend to have their fair share of indirect and embodied rebound effect—as they use the newly saved income for luxury goods with high energy content. Our results are globally consistent with the previous findings. However, we go a step further since instead of using income as the sole segmentation determinant, we allow the group definition to include more variables such as, for example, the family type, the living area and the dwelling type. Thanks to these additional factors, we highlight the fact that socioeconomic groups provide more information than just income for targeted policy measures. A disaggregated approach using data mining and decision tree algorithm has been developed by (V. White et al., 2012) in their numerous reports for OFGEM on the UK residential market. Our research and methodology stems from these reports and original approach that we extended to the understanding of various topics regarding fuel poverty, high income high consumption behaviours and energy policy market segmentation (as described in the results section).

3. Methodology: decision tree growing analysis using CHAID method

We use the Chi Square Automatic Interaction Detection (CHAID) method²⁷ developed by Kass (1980) to analyze the annual energy consumption of French households in the residential sector. The CHAID method stems from the popular data mining technique AID (Automatic Interaction Detection) and is mostly used in survey datasets for segmentation analysis. This technique of tree growing—also known as “hierarchical splitting”, “partitioning”, “group dividing” or “segmentation”—is widely used in strategic marketing for partitioning data into homogeneous groups in terms of the response variable.²⁸ Its aim is not necessarily to improve the prediction power of a linear regression, but to gain better knowledge on how the variables of interest are linked to the explanatory variables beyond the restricted additive influence (see, e.g., Morgan and Sonquist, 1963). In our case, we want to test whether our understanding of French households’ energy consumption and expenditures in the residential sector is improved when using a disaggregated prism rather than an average national measure.

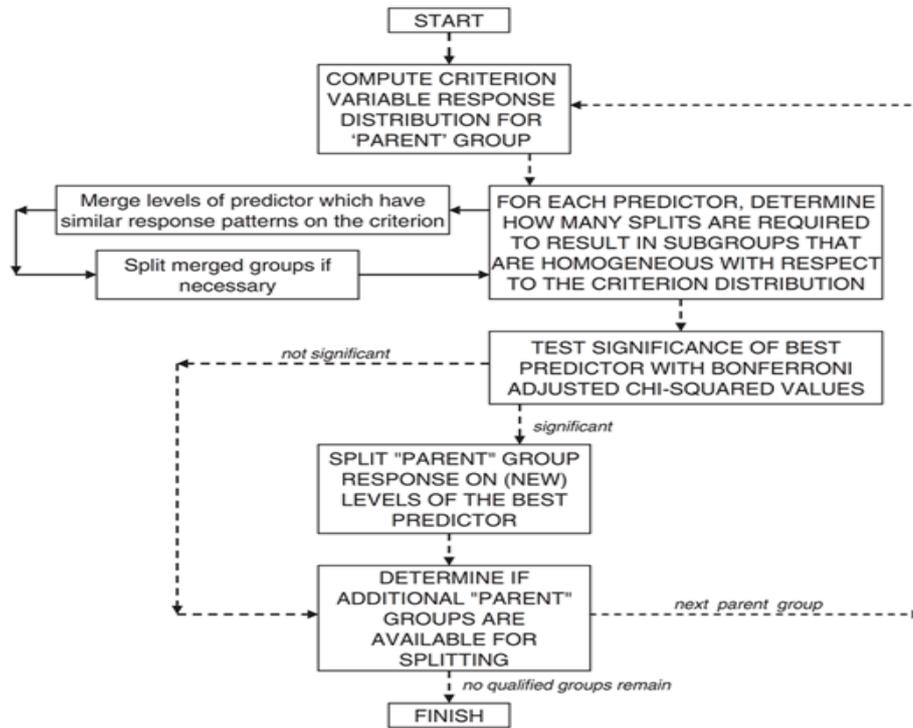
3.1. General presentation of the method

“Particularly in the social sciences, there are two powerful reasons for believing that it is a mistake to assume that the various influences are additive. In the first place, there are already many instances known of powerful interaction effects -advanced education helps a man more than it does a woman when it comes to making money, [...] Second, the measured classifications are only proxies for more than one construct. [...] We may have interaction effects not because the world is full of interactions, but because our variables have to interact to produce the theoretical constructs that really matter.” (Morgan and Sonquist, 1963).

²⁷ See Appendix for a summarized description.

²⁸ The first tree growing methods have been identified by Belson (1959), and Morgan and Sonquist (1963). The AID algorithm is a binary regression on a quantitative variable, which is the most popular “group dividing” data mining technique. It has been enriched for (i) categorical outcome, using a so-called theta criterion (THAID or Theta-AID), thanks to Messenger and Mandell (1972) and Morgan and Messenger (1973), and (ii) for multivariate quantitative outcome variable (MAID).

FIGURE 7. THE CHAID ALGORITHM



SOURCES: DIAGRAM FROM KASS (1980)

Its aim is not necessarily to improve the prediction power of a linear regression, but to gain better knowledge on how the variables of interest are linked to the explanatory variables beyond the restricted additive influence.²⁹ In our case, we want to test whether our understanding of the French households' energy consumption and expenditures in the residential sector is improved when using disaggregated prism rather than an average national measure.

The different phases of the methodology following the diagram created by (Kass, 1980) are shown in Figure 7 and sequenced as follows:

1. We determine the key predictors of mean and median energy consumption levels. They might be socio-demographic or dwelling characteristics and localization, or exogenous factors such as climate and unobserved effects. To this end, we use both Multiple Correspondence Analysis (MCA) and logistic regression. Determination of key predictors is grounded in the next section and models selection results can be found in the appendix.

2. We implement the CHAID method to hierarchize and separate group energy consumption levels with respect to the key predictors in order to start a household typology based on energy effort rate
3. We test the value of emerging archetypes (changing the dependent variable and/or key predictor variables).
4. We feed the archetypes into the complete dataset and enrich the profile analysis (with frequency and MCA-based tests).
5. We analyze specified groups (coupling key leverages for successful efficiency programs) and present the findings and policy implications.

It is worth mentioning that CHAID allows the predictors to be either monotonic (relying on an ordinal scale) or free (purely nominal) as in AID, but the main novelty is the development of a floating predictor. The latter allows one category of an ordinal variable to have an unattributed, ergo unknown, position on the ordinal scale, which is highly convenient when dealing with a missing category which is frequent with microeconomic survey data. The CHAID technique aims at maximizing the homogeneity of each group by means of purity measures using a floating predictor which has been proved to be most useful in micro-econometrics.

3.2. Advantages and limits of the CHAID method

Let us now briefly compare the CHAID approach with the main other techniques. Consider first AID-based methods. Ritschard (2010) describes two CHAID features that contribute to its popularity. First, CHAID selects the predictors on the basis of the optimal split each potential predictor would produce at each node (continual significance). Whereas AID selects the “most explanatory” split, CHAID would rather choose the “most significant” one. Second, CHAID uses p-values with a Bonferroni correction as splitting criteria. It is a statistical significance test that accounts for multiple testing. There exist other decision-tree methods like THAID or MAID; the main difference lies in the definition and parameterization of the splitting criteria: residual sum of squares (RSS, or “within” sum of squares) for AID, generalized RSS for MAID, theta for THAID, and Fisher or its Chi-square approximation significance test (p-values with a Bonferroni correction) for CHAID.

Second, unlike the CART (Classification And Regression Tree) method, the CHAID analysis does not allow for continuous variables in the model. It therefore exposes the analyst that arbitrary splits a continuous variable himself to misspecification costs, but this argument is weak when the chosen categories for a continuous variable are of value themselves. For instance, when we split energy

consumption in deciles, we allow for an easier comparison with other relevant decile categories like revenue or budget. Comparing CART and CHAID analyses, Haughton and Oulabi (1993) found that the two models yield very close results and highlight three main conclusions. Firstly, CHAID model is much more easy and accessible to run with a personal computer. Secondly, CART method is preferable if the model has a very large number of explanatory variables (more than 600), but it is not our case. Finally, when dealing with missing variables, CART is of great advantage when they appear for a continuous variable, but CHAID is preferable when the missing observations are of special significance to the response variable. If the latter is confirmed, one must create a special category of missing values when using CHAID. Overall, given their quite similar performance (despite different statistical techniques), one will use (i) CART if the dataset contains many continuous variables, and (ii) CHAID for datasets with fewer and categorical explanatory variables, as in our case.

Finally, the third main approach is the logistic regression (McCarty and Hastak, 2007) which provides a response probability on a dichotomous variable. Decision trees segment the dataset into homogeneous groups of people according to a categorical (CHAID) or continuous (CART) variable, the first one being privileged for its predictive power and the latter for its explicative power. Furthermore, as our variable of interest is richer when divided in decile rather than binomial, the CHAID method is preferable. Lastly, the CHAID method, unlike the logistic approach, is distribution free. It means that it allows the relationship between the explanatory variables and the response variable to be non-monotonic (curvilinear for instance).

Despite its various advantages, four main limits of the CHAID methodology have to be mentioned. First, due to a heuristic approach, the model does not guarantee optimality since it is a forward stepwise method: once a variable is chosen, it cannot be eliminated in a later stage (Van Diepen and Franses, 2006). Hence the trees cannot determine the global importance of each factor. We overcome this limit by running a previous multiple correspondence analysis and global significance tests (Fisher) on ordered logit regressions to select explanatory variables that are globally and individually significant (see Sections 3.2.3 and 4, and Appendix 7.2). Second, the tree instability raises two issues. On the one hand, the segments derived by CHAID differ significantly with respect to the criterion. On the other hand, the decision tree stems from random iteration tests and the results (number and criteria selection) can vary when the same model is implemented to another dataset. Consequently, if the original data is replaced with a fresh sample, a different tree emerges with different splitting rules. In our case, a different CHAID tree for the 2013 housing survey dataset is detrimental, but not catastrophic because it can provide information on a new

segmentation that explains new energy consumption behaviors and attests that they have slightly changed between 2006 and 2013—especially because we introduced the role of unconventional fuel in the energy effort rate estimation. Third, CHAID analysis may encounter over-fitting problems: the predictions of the response variable could be worse than in the absence of a model, even if the CHAID tree fits the dataset well. However, this issue can be relativized in our case as we are looking for a way to target households in an existing dataset and to explain energy consumption rather than predict it. Finally, the CHAID method is mainly intended for large samples (min 1 000 cases; Doyle, 1973). The approach uses the Chi-Square test of independence and therefore assumes that the variables follow a chi-square distribution, a property which is asymptotically verified in large samples such as in our case. On the whole, all those aforementioned issues are overcome in our analysis, thanks to our methodology and the properties of our dataset.

3.3. CHAID in practice: brief description of some verification steps

As stressed above, we have to check in the first step of the implementation of the CHAID method the global goodness of fit of the selected variables. To this end, we rely on MCA and on the estimation of an ordered logit model. MCA is an extension of simple correspondence analysis devoted to the cases in which a set of individuals is described by a set of qualitative variables. It can be implemented on a large set of categorical variables, a property which is particularly adapted in our case. Roughly speaking, MCA is a dimension reducing method as it represents the data as points in a low-dimensional Euclidean space. Its aim is to detect and represent underlying structures in the data set, and to identify associations between levels of the categorical variables. Implementing this method allows us to select the variables which are the most relevant for our analysis. For the sake of completeness, we also estimate an ordered logit model in which the energy effort rate (ordered)—i.e., the ordered budget share dedicated to residential energy annual spending—is regressed on a set of explanatory variables, and assess the significance and correlation of each independent variable with the endogenous variable. As for MCA, this estimation allows us to select the relevant significant explanatory variables. The corresponding estimation results are reported in the next section.

Another important verification step concerns the calculation of an energy efficiency distortion score. Specifically, the cluster analysis allows for operational tools to reduce uncertainty about the gap between predicted and real consumptions. Distortion score is a useful tool for financial and insurance mechanisms when energy efficiency investments involve more than one economic

agent, and are subject to information asymmetries and moral hazard. The score can be used for energy efficiency financing contracts based on retrofit cash-flows as it minimizes the outcome interval and reduces information asymmetry between the energy consumer, the investor and the financing agent.³⁰

We calculate this score using the synthesis of two effects, an intensity factor and a revenue factor. The intensity factor, already proposed by Haas and Biermayr (2000), is based on the ratio between the observed and the theoretical energy consumption. It is estimated in terms of income, price and efficiency elasticities to address the relationship between intensity, energy prices, income and building performance. The revenue factor illustrates the link between the intensity factor and a theoretical budget share to differentiate restrictive behaviour and unconstrained behaviours as described by Allibe (2012). In the present research, the distortion score is a combination of the ratio between average and group specific energy expenditures and the ratio between average and group specific annual income.

4. Data and explanatory variable selection

4.1. Explanatory variable selection

Energy demand is a latent variable derived from a set of characteristics that can be divided in three types: household characteristics (such as income, family type, living habits or comfort needs), dwelling characteristics (such as size and type), and exogenous factors such as the local energy mix (especially whether households have access to city gas or not). Let us now survey the economic literature on these different issues according to three main themes.

4.1.1. Income and prices

Demand response will vary accordingly to the income level. The total income sets a budget constraint that drives directly the quantity of energy service consumed and its evolution with price and income path *via* demand elasticity. This highlights the importance of having detailed information on household revenue level and repartition decile. Income also influences the implicit discount rate at which households make investment decisions for equipment (Hausman, 1979) or energy efficiency strategies (Hasset and Metcalf, 1993).

³⁰ See Appendix 8.2 for further details on the score construction.

As a normal good, an increase in energy prices should trigger a reduction in the household energy demand level by using less energy services (they can lower the temperature at home) or substituting other inputs for energy and choosing less energy-intensive appliances or even homes. While the first arbitrage can be realized in the very short term, the second one requires a sharp investment in capital and is only possible in the medium term (new heating system) or in the long term (a change in location and home). The relationship between budget share and income has several shortcomings (Blundell et al., 2014): demands for commodity are nonlinear with income, and the Engel curve is well known to differ by demographic type across households. Using a panel data modeling, Jamasb and Meier (2010) find that the energy consumption behavior of UK households heavily depends on income level. Indeed, energy spending globally increases with income,³¹ but its magnitude augments accordingly to income thresholds as it reflects the changing nature of energy, electricity and gas consumption when income changes.

Income level could also be considered as a proxy for assessing a specific degree of comfort and the intensity factor among households. As their income rises, households tend to exhibit preferences for less energy-intensive housing and appliances, as they do not want to sacrifice any comfort in an energy price increase context. In recent French and UK studies (Druckman and Jackson, 2008; Cayla et al., 2011), the relationship between income and comfort level describes a factor 2 difference between comfort levels for the 10% poorest and the 10% richest households. In fact, the gap between expected and real consumption can reach up to 65% in energy consumption overestimation, in comparison with a model which includes an intensity factor—the latter is mainly driven by energy budget share, behavioral factors (elasticities and rebound effect), and non-standardized space heating management (Cayla et al., 2010).

4.1.2. Household characteristics

Household characteristics appear to influence at least 33% of energy consumption variations (Sonderegger, 1977; Cayla et al., 2010). In fact, occupant characteristics should play a key role since they determine the type of dwelling people live in (Guerra Santin et al., 2009). First, household size and composition influence the choice of the heating system type. For instance, there exists a correlation between family size households and electric heating (Vaage, 2000; Braun, 2010). The latter is more suitable for small and active households who tend to spend less time at home. Second, household tenure is also playing a significant role. Property owners and tenants react differently to income and energy prices changes (Meier and Rehdanz, 2010).

³¹ Energy is used for necessity needs at low income levels and is enriched for higher incomes (Meier et al., 2013).

Moreover, ownership lowers the energy price vulnerability, as home owners are more likely to have energy efficient houses (Rehdanz, 2007). Third, the presence of learning effect towards more efficient energy use is also important, although results regarding learning factors such as age and occupancy time are not clear cut in the literature, being sometimes significantly associated (Meier and Rehdanz, 2010) and sometimes less obviously associated (Wyatt, 2013) with different levels of energy consumption. Last but not least, comfort level is a key factor, especially when investigating the elderly and more vulnerable household groups (Meier and Rehdanz, 2010). Very poor households can use comfort as an income arbitrage: they choose to spend less on energy expenditures but accept, in turn, a decreased comfort level (low room temperature or fewer heated surface) (Devalière et al., 2011).

4.1.3. Dwelling type and regional characteristics

Dwelling characteristics such as the age, size, floor area of the housing, and its distance from other dwellings are also major factors to account for when observing an increase in energy use (especially for dwellings of up to 100m²) (Wyatt, 2013). The impact of the dwelling type reveals in many studies the strong correlation between dwelling characteristics, income and tenure. Owners tend to live in detached or semi-detached houses, whereas flats are mainly rented. As such, if heating expenditures are mainly due to differences in the types of dwelling, comparing owner and renter heating expenditures for one type of dwelling (flats or houses) does not always lead to different results (Meier and Rehdanz, 2010). Regional and geographic location can play a significant role, as highlighted by, e.g., Braun (2010) and Roberts et al. (2015). For instance, when households are located in a cold area, it leads to higher heating expenditures, regardless of the weather, because those households have a better heating equipment and experience an increased level of comfort during cold days (Meier and Rehdanz, 2010; Cavailhès et al., 2011).

Why do we need a segmentation analysis for energy expenditures in the residential housing market? Studies analyzing energy consumption at an individual level basis are usually of two types: discrete (demand for appliances) or continuous (demand for the energy itself) models, or conditional demand.³² Another approach to energy demand modeling is to specify the average relationship between energy expenditures and household characteristics as nonlinear, and assign an energy expenditure level probability to a homogenized household group, where each agent within the group is supposed to have the same energy consumption level. Analyzing the relationship

³² For discrete and continuous models, see, e.g., Dubin and McFadden (1984) on US data, and Nesbakken (2001) on Norwegian data. Turning to the conditional demand approach, see Parti and Parti (1980) for the US, Baker et al. (1989) and Meier and Rehdanz (2010) for the UK, and Redhanz (2007) for Germany.

between income and domestic fuel use, Druckman and Jackson (2008) highlight the relevance of a regionally-disaggregated (national/local) approach, evidencing many groups with specific energy consumption habits, showing that: (i) households in cities spend the lowest proportion of disposable income on fuels, and (ii) “City Living” but also “Typical Traits and Prospering Suburbs” are groups that may be called “fuel rich” as they spend the lowest share of their income in fuel, their long-run price elasticity of demand being therefore inelastic.

4.2. Data

We rely on individual household-level data extracted from the most recent housing survey conducted by the French national statistics bureau³³ on households in their housing in 2013³⁴. The survey describes the income, housing characteristics and energy consumption habits of 28 600 French households. Although the number of observations is rich enough to describe accurately French household’s energy and housing habits, there exists an acknowledged bias that underestimates the poorest section of the population, which is trickier to include in such national surveys (data collection issue). Furthermore, energy expenditures are only reported for households with individual heating (i.e., 90% of the landlord population, but only 64% of the tenants) as energy detailed expenses are more identifiable. After clearing the data from extreme values in energy consumption and income, we lose 2596 observations, i.e. 11% of the original dataset and we work on a final dataset of 26 004 observations.

We consider three types of variables of interest: energy expenditures, energy budget share and weighted energy expenditures (€ spent by m² per dwelling inhabitant) all measured annually (see appendix 8.2 for detailed statistics). As for explanatory variables, we focus on the energy budget share because we consider it as a good starting measure for estimating rebound effect and investigating specific groups such as fuel poverty ones. We analyze energy spending, elasticities and expenditure distribution across homogeneous groups of households and propose another indicator for fuel vulnerability and poverty. The choice of our explanatory factors is drawn from our previous review of literature (see Section 2) and the selected variables are reported in Table 4. As shown, our set of variables includes (i) household characteristics such as income level, household size, household tenure, occupancy duration, age of representative, and profession, (ii)

³³ The detailed results of the housing survey can be found on the website of the National Institute of Statistics and Economic Studies (INSEE) : <http://www.insee.fr/en/default.asp>

³⁴ data were available on request and under strict conditions in May 2016 from the public data management center : Réseau Quetelet

dwelling type like the age of the housing and energy mix, and (iii) regional and localization characteristics, i.e., climate zone and urbanization level.

TABLE 4. KEY PREDICTORS SELECTED FOR DECISION TREE GROWING ANALYSIS

Selected variable for CHAID decision tree	Degrees of freedom	Description
Energy effort rate decile	10	Ordered budget share dedicated to residential energy annual spending
Dwelling type	2	1. Houses 2. Collective dwellings
Heating technology mix	3	1. Electric heater 2. Gas heater 3. Unconventional (wood, liquid fuel, coal)
Income quintile	5	Ordered annual total income distribution
Climate zone	4	1. North East; 2. Centre; 3. West coast and South West 4. South East
Tenure	3	1. Tenant; 2. New landlord; 3. Old landlord
Age of representative	5	Ordered age of household representative quintile
Household family type	6	from 1. Single person to 6. Large families
Urban zone	5	from 1. Rural to 5. Paris
Building' construction date	8	from 1. Before 1870 to 8. After 2012
Occupancy duration	5	from 1. Less than a year to 5. More than 12 years

SOURCES: AUTHOR

NOTES: THE KEY PREDICTORS ARE SELECTED AFTER AN ORDERED LOGIT REGRESSION ON ENERGY EXPENDITURE DECILE. DURING THE VARIABLE SELECTION PROCESS, WE RULED OUT THE SOCIO-PROFESSIONAL CATEGORY OF THE HOUSEHOLD REPRESENTATIVE AND THE OCCUPANCY STATUS AS THEY WERE NOT SIGNIFICANT ACCORDING TO THE LOGIT BASED TESTS.

5. Results

Results are obtained using the Stata13® software that provides a CHAID tree growing built-in program. We first describe (section 5.1) the identified groups resulting from the CHAID algorithm implementation and analyze the segmenting variables that feed the model before focusing (Section 5.2) on two selected pen portraits: the fuel poor households and the “high income high energy-consuming” households. Then (Section 5.3), we display the groups in a two-dimension plan in order to realize market segmentation for residential housing. This method highlights potential rebound or back-fire effects as well as windfall effects. Finally (Section 5.4), we investigate the benefits of using a scoring method in order to reduce *ex post* uncertainty for energy efficiency investments.

5.1. Cluster tree

We investigate French households' energy annual budget share, considering a vector of variables of three kinds: household income and characteristics, dwelling type and energy mix, and localization features (climate zones and urbanization level). We first rely on an ordered logit model and a MCA classification to test the global goodness of fit of the selected variables. The results of this first verification are presented in the appendix.

We then conduct CHAID method on energy expenditures. Our first-step results highlight that the CHAID algorithm separates the households based on their dwelling type. This result is not surprising because the average energy expenditures double in houses compared to collective dwellings. It also captures most of the variations due to the difference in the dwelling size. Then, the algorithm divides the groups based on their main heating fuel between domestic gas, electricity, domestic fuel, coal, wood and butane (see Table 2). We then focus on those main family groups.

Households living in houses or flats and consuming electricity or gas to heat their homes in France account for two thirds of the heating fuel mix (Table 5). 35% of households have in their energy mix a set of complementary alternative fuel consumption (butane for 25% of them, domestic fuel and wood for 10% and 15%, and coal for 3%). In a second step, the CHAID algorithm then separates households within these families into sub-groups of various sizes that are supposed to consume their respective heating fuel homogeneously.

TABLE 5. RESIDENTIAL HEATING FUEL TECHNOLOGY AND ENERGY MIX BETWEEN 1999 AND 2013

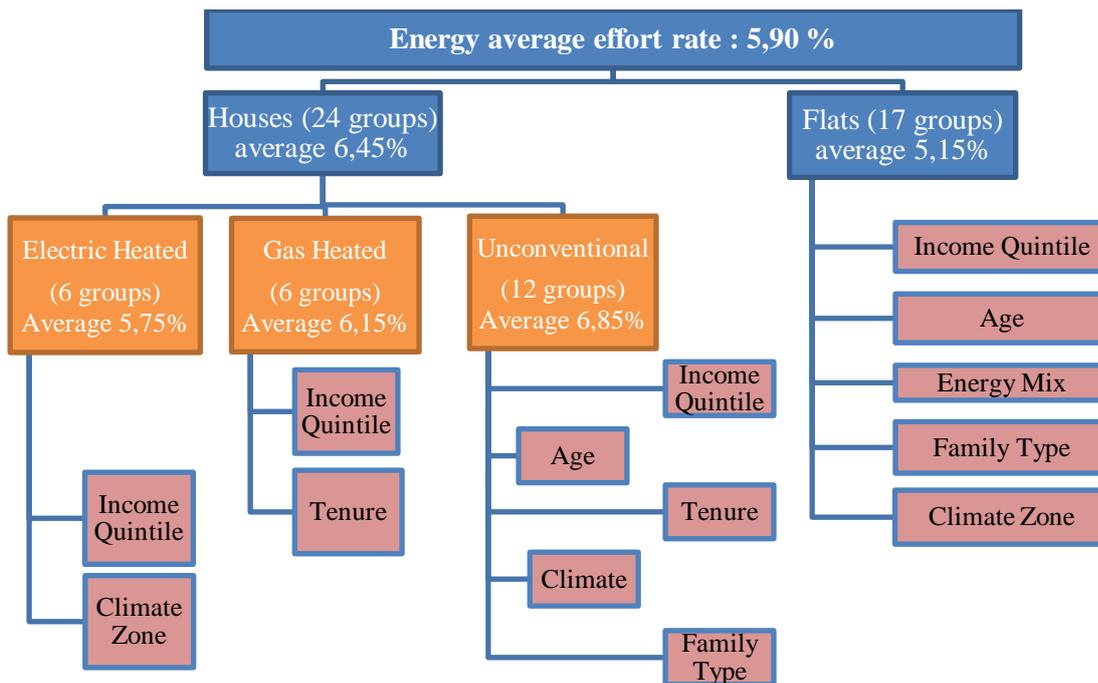
Metropolitan France	1999	2006	2012	2013*
Technology				
Collective Heating	19%	19%	18%	17%
(Including Urban Heating)	18%	27%	28%	ND
Individual Heating	0,421	45%	42%	45%
Electrically exclusive Heated	0,227	26%	28%	30%
Other type for Heating System	16%	11%	12%	8%
Fuel Type				
Urban or Network Gas	35%	36%	36%	37%
Fuel	21%	18%	13%	10%

Electricity	26%	29%	32%	33%
Butane/Propane	3%	3%	2%	26%
Other	0,117	9%	12%	16%
incl. Coal	0,013	ND	ND	3%
Incl. Wood	11%	ND	ND	14%

SOURCES: INSEE (POPULATION CENSUS AND NATIONAL HOUSING SURVEY), 2013

Our analysis leads to the identification of 24 sub-groups in houses and 17 sub-groups for flat housing (Figure 8). As we saw in the descriptive statistics, dwelling type and energy mix have a strong influence on energy bills and budget shares. In flats, electric exclusive groups have energy expenditures between 490€ and 720€, while gas and unconventional heated households' annual bills range between 680€ and 980€. In houses, gas and unconventional heated groups allocate respectively 0.4 pp. and 1.1 pp. more of their budget compared to electric exclusive groups.

FIGURE 8. FINAL CHAID SEGMENTATION TREE FOR FRENCH HOUSEHOLDS' ENERGY CONSUMPTION



SOURCES: DIAGRAM FROM AUTHORS' RESULTS.

Then, income quintile appears to be the first segmentation node, which confirms the strong relationship between income and energy budget allocation even in a nonlinear approach. As the deep cause that influences energy consumption is the difference in prevailing activities between household groups, is it worth mentioning that the underlying process from income to energy consumption passes through activity. The household's family type is also a splitting factor in flats

and unconventional heated households in houses. It is rather straightforward, as the number of active occupants (couple with children or no child, single parent or person) in the household determines the gap between the global budget and the level of heating space required, but also the level of comfort needed.

In flats, households (income, age and family type), dwelling (energy mix) and location (climate zone) characteristics play a significant role in explaining different levels of energy expenses across households. In gas-heated flats, where income appears to be the second node, tenure plays a major role in houses heated with gas, both in budget share and levels. In fact, old landlords are dedicating 1 pp. more (8% vs. 7%) of their budget to energy and consume annually 200€ more than other households (tenants and new landlords).

It is also worth mentioning that the household representative's age and family type are key splitting factors for households living in collective dwellings as well as in houses with unconventional fuel consumption. In flats, regardless of their income quintile but when they heat their homes with mixed gas and unconventional fuels, single persons and couples with no child pay annually around 700€, whereas families and flat sharing people spend more than 900€ per year. On the contrary, the impact of age changes whether the household is rich or poor. When poor (first income quintile) elderly people (aged above 65) consume less than their younger peers per year although when we look at the 4th income quintile, households aged above 50 spend 50€ more than younger households (and 0.1 pp. more in budget share). Note also that households aged more than 65 are richer than their younger peers within each income quintile.

5.2. Pen portraits

We chose a selected few key groups to identify the different leverages of action or policy measures that fit each group best. Each CHAID resulting group is analyzed through its median global energy bill, income, energy expenditures weighted by m² and inhabitants, and its energy effort rate. We chose to present here our typology analysis regarding fuel-poor groups and High-Consumption-High-Income groups.

5.2.1. Understanding fuel-poverty

One of the first fuel-poverty national censuses was launch in the UK in 2001³⁵. UK ministry department of energy (DECC) formerly defined fuel poverty based on the concept of “affordable warmth”. Following suits, France has its own legal framework to define fuel poverty since the Grenelle 2 law of July 12th 2010 (Loi n°90-449). “A household is said to be fuel poor when it faces specific difficulties to satisfy basic energy needs whether those difficulties reflecting financial distress or antiquated housing equipment and/or accommodation. Fuel poverty and vulnerability can take four aspects: resources difficulties, comfort needs, housing quality (or failures) and energy furniture and prices.

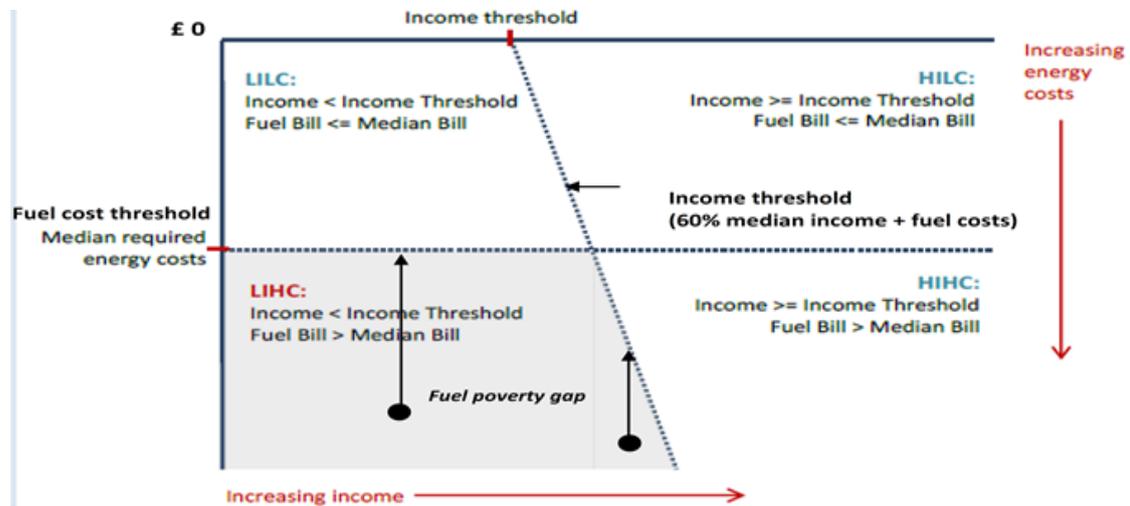
As of today, there are three main fuel poverty indicators. The Energy Effort Rate (hereafter EER) is the historic indicator for fuel poverty. A household is defined as fuel poor according to its energy effort rate if it needs to spend more than twice the median EER³⁶ that is 10% of its income on energy spending, to maintain a satisfactory heating regime. Note that the effort rate is also used as an indicator for fuel vulnerability. In the UK, 80% of the 2.35 million fuel poor are also vulnerable households (Department of Energy and Climate Change; DECC, 2013). The latter can be divided in three categories: low revenue (below 60% of the median income), elderly, allocation benefit households and single parents. Every group has an increased vulnerability to fuel price as corresponding households spend a larger amount of their revenue on energy bills (Hills, 2012). Each group also has very heterogeneous energy consumption habits (Jamasp and Meier, 2011). The Low Income High Costs indicator (hereafter LIHC) has been first used in the United Kingdom by the Hills report published in 2012. The report reveals that EER indicator definition from 2001 isn't fit to assess fuel poverty. It is too sensitive to fuel prices fluctuations and misleadingly because it includes higher-income households living in energy inefficient homes in the fuel poor class. As we can see on Figure 9, according to the LIHC indicator: a household is defined as fuel poor if its income is below the poverty line i.e. inferior to 60% of median income (taking into account the fuel cost) and its energy cost is higher than it's typical for their household type. The indicator has therefore two thresholds: one for income (diagonal because it increases with energy costs) and one for energy costs. The new definition includes a measure of the severity of the fuel poverty called the fuel poverty gap: it measure the gap between the household's situation and each threshold. Both EER and LIHC are quantitative indicators for fuel-poverty based on the measure of the budget share dedicated to energy expenses (that is the median Energy Effort Rate indicator)

³⁵ Since 2010, all the Big Six energy increased their prices, tightening the household's budget shares with a special pressure put on the poorest ones

³⁶ 5% at the time of the researches

and the equity factor that equilibrates energy expenses and income (that is the Low Income High Consumption indicator).

FIGURE 9. LIHC INDICATOR AND FUEL POVERTY GAP

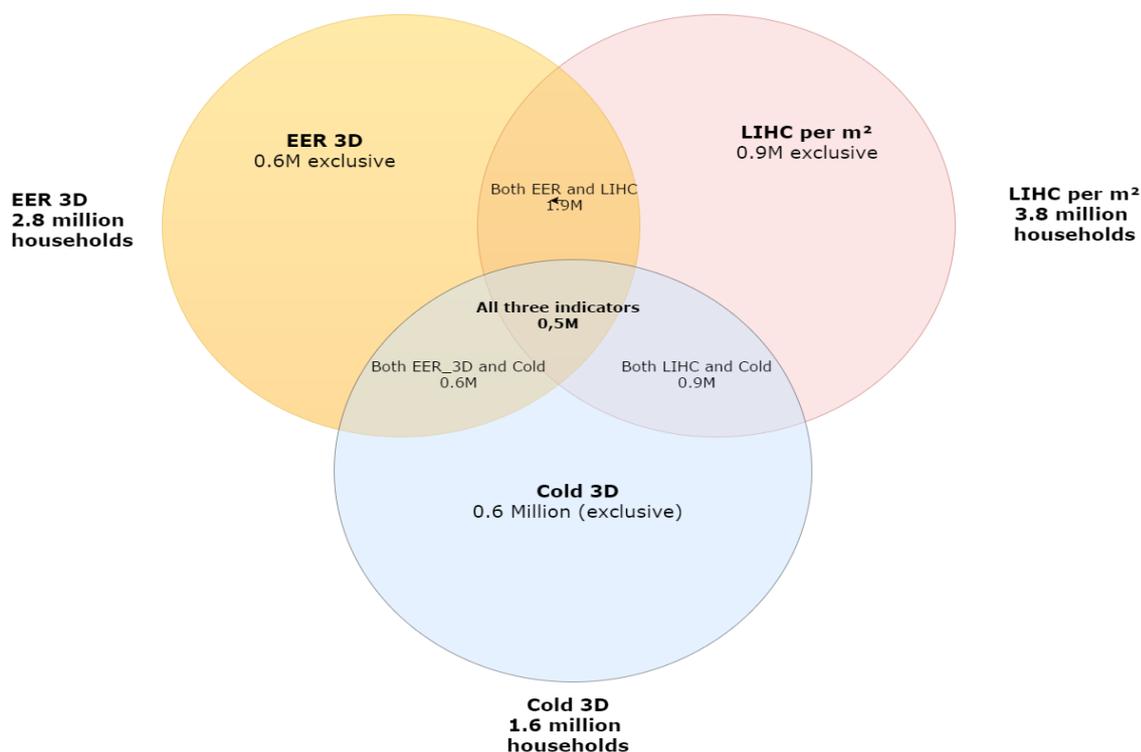


SOURCE: (HILLS; 2012)

A third and more qualitative indicator is used in France. Derived from the national housing survey, it counts every five years how many households have suffered from cold due to financial difficulties, antiquated accommodation and/or heating equipment during the last winter (that is the “self-revealed” fuel poverty indicator or Cold indicator). Hills’ report and the French Phebus survey (2013) revealed that 25% of households are restraining their energy consumption due to budget constraints. The Cold indicator from the French National Housing Survey (2006 and 2013) can give a glimpse of what income-based indicators are missing. When asked, if a household declared that it suffered from cold due to resources and housing quality is said to be hit by fuel poverty according to this declarative method.

Taking into considerations the windfall effects of the historical EER, both UK and France have restricted the fuel poverty revenue and declarative indicators to the first three income deciles. The LIHC indicator doesn’t take into account the 9% households that have less than 60% of the income median to live but spend less than the median in energy. This “low income, low consumption” group (or LILC) can gather very different types of situation. Some households in that group can enjoy a housing quality good enough to have low energy bill despite a low income; some households can choose to restrain their energy consumption until they hit a minimum comfort standards. In the case of France, thanks to the information given by bold Indicator and ONPE report, both situations are statistical facts as shown in the Venn diagram (Figure 10).

FIGURE 10. VENN DIAGRAM OF FUEL POVERTY INDICATORS



SOURCES: AUTHOR, DATA FROM ONPE, 2016 AND INSEE, 2013;

In France in 2013, there are 2.8 million households (that is more than 5.5 million of individuals) that spend more than 10% of their annual income on energy bills for their housing (Table 6). ONPE (2016) shows that 0.8 million households spend more than 10% of their income on energy but don't belong to the first three income deciles. LIHC is normalized by meter square to favour comparison and avoid scaling effects (larger homes are more difficult to heat but reflect a higher patrimonial value for landlords). According to that indicator, 3.8 million households cumulate high energy bills (above median) and low revenue (below 60% of median income). There are even more households that declared suffer from cold due to tight budget constraints during the winter 2012/13. Note that the number and share of fuel-poor households increased between 2006 and 2013 for all three indicators. We recall that the 2006 survey was set during a cycle of very low prices (Figure 6).

TABLE 6. FUEL POVERTY INDICATORS IN FRANCE IN 2013

	EER 3D	Cold 3D	LIHC	National
2006				
Households number	2.2 M	1.6 M	3.2M	25,8 M

Share in total	8.4%	5.3%	12.4%	100%
2013				
Households number	2.8 M	4.4 M	3.8 M	27,2 M
Share in total	10.4%	16.2%	13.9%	100%

SOURCES: DATA INSEE; ENL 2013 AND ONPE, 2016

Revenue indicators have changed a lot between 2006 and 2013 whereas the declarative “cold” indicator budgeted less (+14%). EER3D increased by 30%, in fact we realise that very poor households were more impacted than other by the effort rate and the energy prices. Note that 2013 marked a peak relatively to energy prices and results translate this price difference. Median income is drastically different between fuel poor households and their peers, even with the same income deciles (500€/month difference). Fuel poor households also spend more than others within the first three deciles (50€/month more). Indeed, as spending on fuel is a “necessity” for low income levels (Jamassb & Meier 2010); poor households spend a higher share on income on fuel than the rich. The Q1 poorest households spent 11% of their income on house energy in 2013 (up from 8% in 2002) whereas the richest Q5 spent just 3% (2% in 2002).

According to the existing literature, the main factor that triggers or identifies fuel poverty in Europe is the housing location, the region’s climate playing a key role in the ability to adequately heat a home, along with (i) residing in a rural area followed by (ii) residing in an intermediate area of urbanization (Thomson and Snell, 2013). While, on average, there are similitudes in the fuel poverty rate between rural and urban households, the impact of specific dwelling and socio-demographic aspects combined reveals critical differences. Although urban households are more likely to spend more time in fuel poverty, rural households are expected to fall into worsened levels of fuel poverty (Hills, 2012), and are more vulnerable to fuel prices especially when they live in private rental accommodations (Roberts et al., 2015). The fuel-poverty risk factors in France appears to be first income decile, tenant status (when it combines with lower revenue and lower housing quality), single person households, single parent families. They also tend to live in old and poor housing quality (especially in building built before 1975). But the risk factor changes given the indicator used as fuel-poor households are not exactly the same whether they are fuel poor according to the EER indicator or the LIHC indicator. In fact, EER indicator more often qualifies rural old landlords in bigger houses than the other indicators and LIHC indicator are more often composed of young actives. This can lead to a “windfall effect” and inequality problems evoked by Charlier (2015). I will also develop these issues in the next section.

The fuel-poor groups we identify from the CHAID tree are those that combine a high energy effort rate (low income), low comfort (“cold” declaration in the survey), and above median energy expenditures. The fuel poor groups are in this case, representing 18.5% of the total population that is 4.8 million households. A majority (60%) of our fuel poor groups is living in flats and, unlike in houses, they do not reach the 10% energy effort rate threshold that usually identifies fuel poor households. Nevertheless, fuel poverty in houses seems more severe than in flats because fuel poor groups’ energy budget share amounts to 7% in flats and 13% in houses. They are gas- or unconventional-heated households with below median energy consumption (630€ in flats and 1420€ in houses). What makes them fuel poor is that they have a very low income: both groups belong to the first revenue quartile, living with less than 1000€ per month. They live in old and quite small size housings (between 55m² for flats and 90m² for houses). In fact, more than ¾ of the group population live in dwellings built before 1975 that is before the first energy related construction norms were enacted in France (RT75). Those groups are mostly single person (65%) or single parent (12%), either aged above 65 (28%) or below 30 (22%). Most of them are tenants (65% of group population) living in medium or high density areas. Those groups are defined out of the energy efficiency market, and are clearly a target for public policy measures, social benefits and help. For example, the French government set the objective to refurbish and make energy efficient all buildings that consume more than 330 kWh /m² /year by 2025. This objective concerns most of the pre-1975 dwelling stock where a fair majority of fuel-poor households tend to live in. In that case, public government should expect to help financially those households to retrofit their homes (or relocate them while their landlords do so).

5.2.2. High Income High Consumption (HIHC) households

At the opposite, the second group of interest corresponds to “High Income High Consumption” (HIHC) households that could feed a spawning energy efficiency market for private housing. In other words, these are households with high energy expenditures, as well as high income and the lowest energy share, making them receptive and financially capable of enacting energy efficiency measures on their homes (household groups that are in the market). We identify six household groups which represent 4.25 million households (47% in houses and 53% in flats) and 16% of the whole survey sample. We find that they have very low energy effort rate relative to their peers (1.63% in flats and 3% in houses), due to a very high income (HIHC groups belong to the 8th and 9th income deciles). They also have energy expenditures 20-30% above the median. They spend 940€ per year in flats (vs. 720€ for flat median), and 2050€ per year in houses (vs. 1700€ for house median). Their high energy expenditures can be explained by the fact that (i) they are new owners for 40% of them, and (ii) they use unconventional fuel more often than households within the

same income group. Aged between 30 and 65 years old (75% of group population), they live in Paris and high urban density areas, and have big flats: 60-100m² (60%). For 70% of them, they live as couple with children (41%) or no child (32%). They are white collars (31% active or 11% retired) liberals or intermediate professions.

This group is a good starting point to prospect for energy efficiency “in the market” measures because it includes households that have both high revenue and energy expenditures that suppose a self-incentive to engage in energy efficiency investments. This group should react more positively to an informative or coercive measure than an income nudge to engage in energy efficiency. Indeed, using information on energy retrofit investments made during the same year of the survey, we find evidence that the HIHC group has just slightly engaged more energy isolation retrofit than other households (20% of them vs. 17% on average). But, if they choose to invest in energy retrofit, the HIHC households spend 1.6 times the amount the other households spend on average (21 300€ vs. 13 200€). For example, this group being composed largely by new owners, a financing package that couples dedicated retrofit zero rate loans with property loans could be a great advantage to push those households to engage in energy efficiency investments at the same time they are buying their first home.

5.3. Market mapping

This section is an attempt to drive the attention towards energy policies that can produce mixed results on each household group, whether they are targeting fuel poverty, energy efficiency or energy savings. To make my own market segmentation of energy expenses by household groups, I will use both income and energy consumption thresholds (as in Figure 9). The objective is to develop an indicator for energy efficiency distortion effect that illustrates both rebound and windfall effects. This projection allows us to separate more clearly the groups with respect to an intensity effect (how far are the household’s energy expenditures from the median) and a revenue effect (how far is the household’s annual income from the median). These figures give us a visual perspective on the energy policy incentive and potential effects on each group, and emphasize the importance of having a disaggregated-group approach regarding energy policy measures.

Figure 11 and Figure 12 represent our household groups dispatched on an income versus global energy expenditure plan with indication of their weight in the sample: the bigger the bubble, the bigger the group in population size (numerical figures are shown in appendix 8.2). The energy efficiency market can be divided in four parts, with an income-based segmentation from left to

right and an energy use intensity-based segmentation from top to bottom. First, given that we observed that fuel poverty was mainly income poverty in disguise, income is the main driver for energy policies market segmentation. Households with enough revenue to engage energy efficiency investments are said to be “in the market” and will be sensitive to market-based incentives (fiscal tax or cuts, or investments nudges) in order to trigger energy savings or energy efficiency investments. Households with a revenue below median (and among them the fuel poor that earn less than 60% of the median income) cannot afford energy efficiency investments on their homes and are therefore more sensitive to “off market” policy measures, such as social benefits, revenue transfers and facility payments.

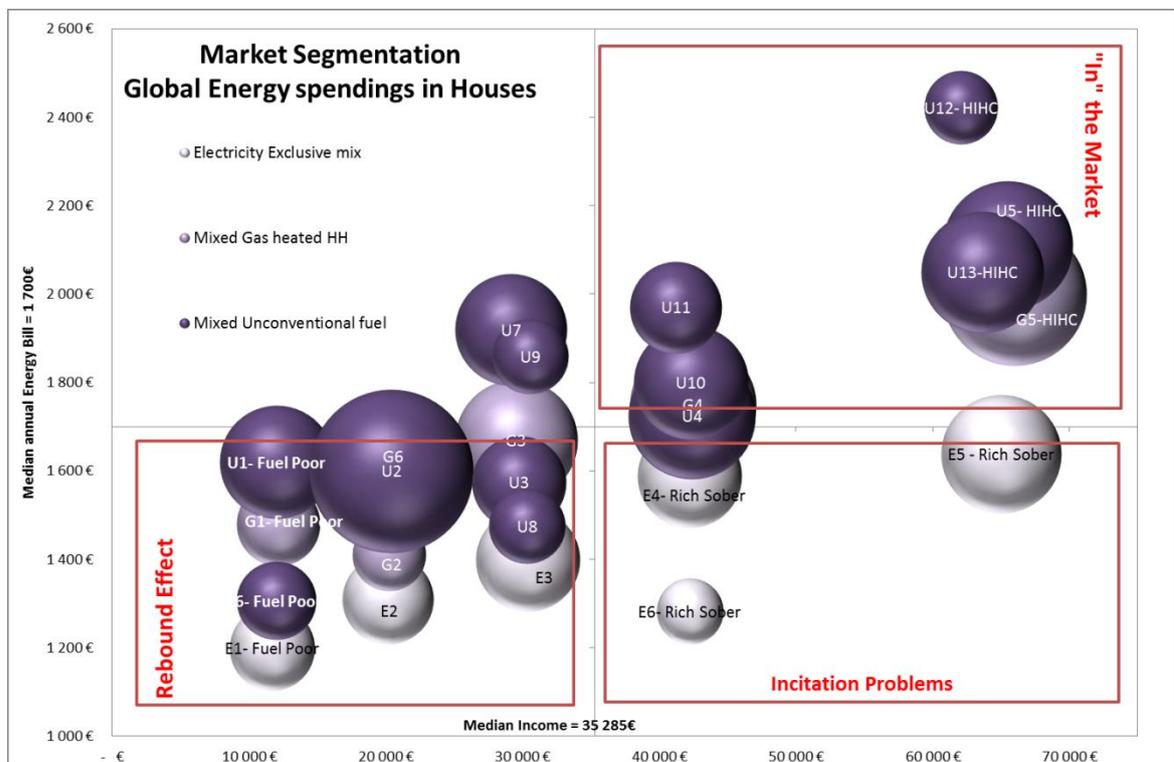
Household groups “in the market” are located on the right quadrant, and “off market” household groups are located on the left quadrant. Second, the market can be divided vertically given each household group’s energy use intensity. Household groups are located top or bottom depending on whether their annual energy expenditures are respectively above or below median for a given housing type. This segmentation is helpful in order to visually identify potential rebound (or backfire) effects from household groups that have a low intensity score. In other words, if a household spends twice as less annually than the median household, then it is more likely that the household will use a significant part of the extra revenue for energy efficiency, as a means to consume more energy service, while still meeting its basic comfort needs.

First of all, our findings show that group segmentation and sizing differ given the dwelling type. Household groups have relatively smooth but positive income elasticity. On the one hand, a fair proportion in population size (more than 30% of global population) is located on the right quadrant, which makes them good candidates for “market” energy policy incentives although three groups that we called “rich sober” have below median energy expenditures. They might exhibit incentive issues (they do not pay enough to see the monetary benefit of more energy efficiency) and therefore need nudges to invest. Those nudges can take the form of revenue incentives, but also of an efficiency constraint (like a renovation norm). On the other hand, at least five groups are located on the bottom right of the quadrant, which makes them strong rebound or backfire effect candidates. Surprisingly, those groups are not all fuel poor groups we previously portrayed, and some of them are electric-heated. Those households face double capital constraint on energy use and equipment. They might have a strong rebound effect, as they sacrifice a lot of their comfort to accommodate their budget constraint and thus consume less than the fuel poor groups.

Furthermore, in collective dwellings, our findings highlight a positive relationship between energy effort rate and income, especially for distribution tail groups we identified as fuel poor and HIHC groups. It should be noticed that we have previously mentioned that energy expenditures in flats are also driven by other factors than income, such as household’s age and family type. In that case, energy policy measures based on a life cycle perspective (by targeting young actives who want to access property before funding a family) to implement dwelling or standards of living-based incentives should be more welcomed than pure income incentives.

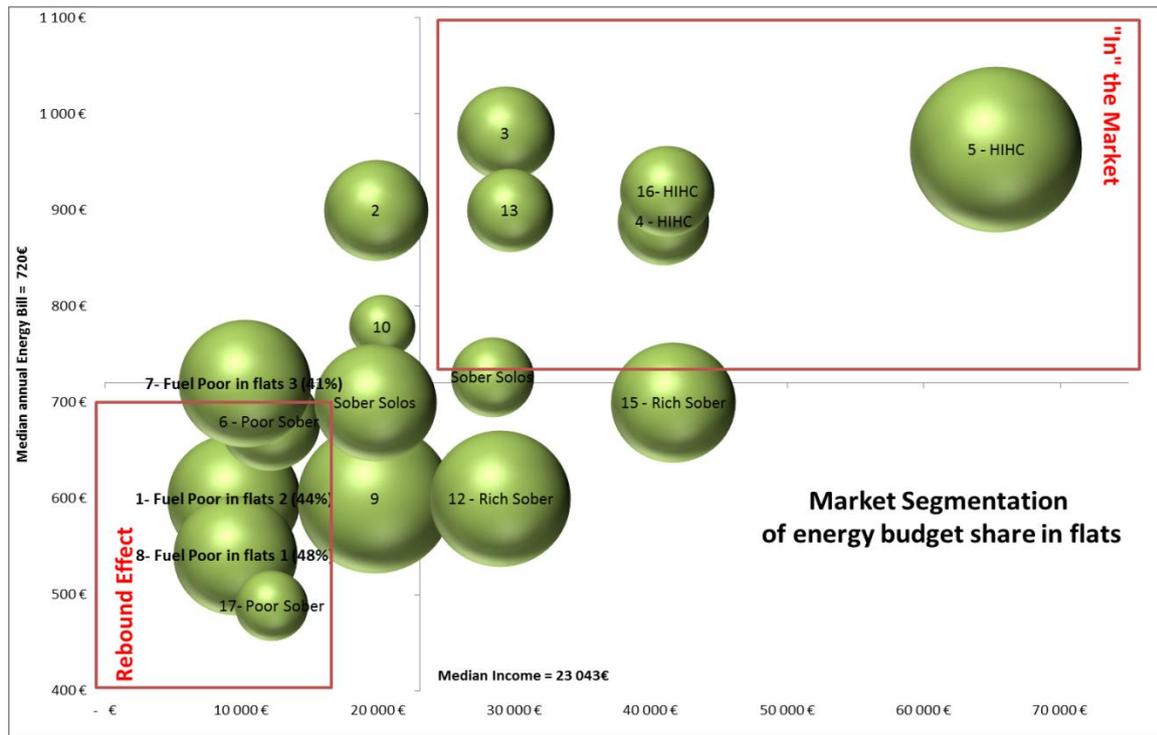
High consumption and high income household groups located top right of the market quadrant in Figure 11 and Figure 12 can enjoy a windfall effect on the energy efficiency market as they can benefit from subsidies and tax cuts, although they already are “in the market” and could probably benefit from energy efficiency investments without the help of such public measures. In fact, Charlier (2015) recently discovered that among the fifth decile households, this “dead-weight loss” effect could concern most of the energy efficiency investments on the French residential market. Keeping in mind that the income effect is much stronger in houses than in flats, households with electric-heated houses are more income sensitive (higher elasticity) than gas-heated houses, making them more sensitive to a free-rider rebound effect.

FIGURE 11. HOUSES MARKET MAPPING



SOURCES: GRAPHIC FROM AUTHORS’ CALCULATIONS AND GROUP RESULTS FOR HOUSEHOLDS LIVING IN FLATS

FIGURE 12. FLAT MARKET MAPPING



SOURCES: GRAPHIC FROM AUTHORS' CALCULATIONS AND GROUP RESULTS FOR HOUSEHOLDS LIVING IN HOUSES

5.4. Energy efficiency distortion score

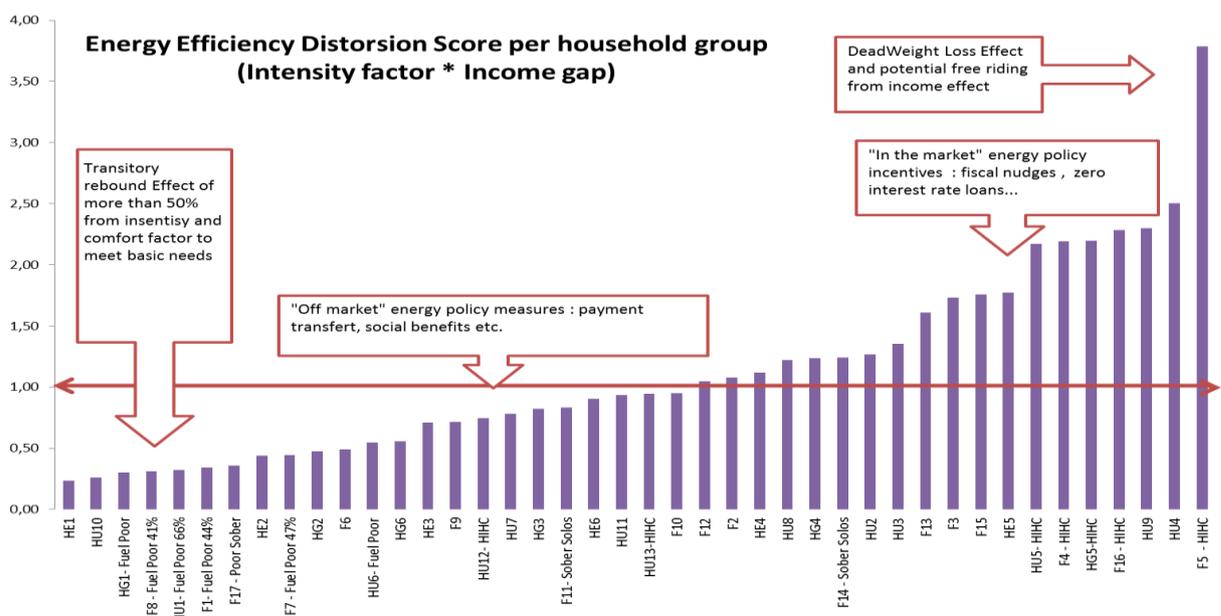
Cluster analysis allows us to model operational tools to reduce uncertainty about the gap between predicted and real consumptions. Distortion score is a useful tool for financial and insurance mechanisms when energy efficiency investments involve more than one economic agent, and is subject to information asymmetries and moral hazard. The score can be used for energy efficiency financing contracts based on retrofit cash-flows as it minimizes the outcome interval and reduces information asymmetry between the energy consumer, the investor and the financing agent.³⁷ We calculate this score using the synthesis of two effects, an intensity factor and a revenue factor. The intensity factor, already proposed by (Haas and Biermayr, 2000) calculates initially the ratio between the observed and the theoretical energy consumption. They estimate it in terms of income, price and efficiency elasticities to address the relationship between intensity, energy prices, income and building performance. The revenue factor illustrates the link between the intensity factor and a theoretical budget share to differentiate restrictive behaviour and unconstrained behaviours as described by (Allibe, 2012). In this chapter, the distortion score is a combination of

³⁷ See Appendix for further details on the score construction from intensity and revenue ratios.

the ratio between average and group specific energy expenditures and the ratio between average and group specific annual income.

Figure 13 displays the results of each households’ group distortion score below. Combining houses and flats groups (42 groups in total), more than half is expected to have a positive rebound effect on energy efficiency measures (58% rebound on average). Moreover, 11 of those groups are likely to exhibit rebound effect of more than 50%. The other 19 groups are expected to embrace energy efficiency measures on their homes with positive attitude or even windfall behavior, such as HIHC household groups—especially in flats.

FIGURE 13. ENERGY EFFICIENCY DISTORTION SCORE



SOURCES: AUTHORS' CALCULATIONS.

The resulting score is slightly S-shaped and reflects the evolution of income and intensity elasticity as household revenues increase. For very low score, the distortion effect is below unity and indicates that households are likely to use an additional budget to meet their “comfort” energy needs, which were previously unfulfilled due to a binding budget constraint (for example, by setting an acceptable level of warmth). Therefore, energy efficiency measures will first exhibit a rebound effect, but will improve and harmonize living conditions among households as well as developing energy efficient behaviors. The distortion score then gets closer to one, until it reaches median household groups and increases greatly above unity for the following groups. A high distortion score reflects high leverage for energy efficiency markets, but a very high score can also be the

sign of the windfall effect and free riding, which can overall offset energy efficiency revenue incentives. High distortion score households can enjoy the extra energy efficiency revenue to meet energy luxury needs according to bigger income elasticity. For example, households can use energy subsidies to change an old heat pump and replace it with a new and bigger one.

6. Conclusion and policy implications

The aim of this research is to provide a disaggregated-level analysis in order to investigate heterogeneity in French households' energy consumption. Using a clustering method based on the CHAID methodology, we show that the main identified drivers for energy consumption are related to the housing's characteristics: heating fuel, dwelling type and size. Whereas income is crucial in determining the level of energy consumed, other household characteristics also play a significant role: the age of the household's representative, the family type and the tenure are factors that should be accounted for when estimating households' energy consumption. On the contrary, we find no significant evidence of the learning effect through seniority influence for energy consumption. Unconventional fuel consumption such as butane, wood, coal and domestic fuel especially, lead to higher energy expenditures and budget share, and provides a good indicator for fuel vulnerability, or even poverty.

Fuel poverty is first and foremost a pendant of poverty itself. Our results show that it is more driven by revenue than dwelling characteristics and/or energy consumption habits. Poor households face a double constraint on (i) the level and price of energy use, and (ii) the quality and type of heating equipment, as they are less likely to gain access to cheaper fuel prices, energy efficient homes and infrastructures. First, low income households are more likely to fall into fuel poverty than richer households because they spend a significantly higher share of their income on house energy than richer households do. Second, they have lower ability and willingness to engage in the energy market (switch supplier tariffs): whereas poor households are well known to play a great role as savvy customers in the food market, they have less access to the energy market and do not drive up supplier competition (Preston et al., 2014). Third, fuel poor groups are over-represented in northern France where the climate is more rigorous, and they are more likely living in big but old houses in rural areas: as such, they are less likely to have access to gas and transport infrastructures in high density living areas, which are identified factors of lower energy bills.

The change in household energy consumption is a complex and microeconomic process, which depends on a range of factors, all related to three types: dwelling characteristics, household characteristics and exogenous factors. Energy policy measures that target a single energy consumption level can only be arbitrary and will exhibit mixed results if they are modeled from technical characteristics or even the average household behavior. If we follow the hypothesis according to which the income elasticity path is S-shaped and differs depending on diverse levels of income, thus reflecting different natures of energy needs and arbitrages, then disaggregated policy measures targeted on household groups is a fair method to take those differences into account and prevent energy related inequalities to linger or grow.

Our group classification approach specifically sheds the light on the energy divide among households and the fact that energy efficiency programs must be implemented carefully, as the uncertain rebound effect can have two origins. The first rebound effect stems from the lowest revenue households with a low intensity factor, and results from the newly unbinding budget constraint and the desire to meet basic energy needs. This rebound effect has to be accounted for but is also likely to be (i) transitory (when fuel poor or vulnerable households all satisfy their basic energy needs, they will use their extra income for something else), and (ii) desirable as the housing stock grows towards more energy equity but also towards more energy performance. The second, at the other end of the energy efficiency distortion score, is the case of very high income households who can use energy efficiency revenue incentives as free riders in order to meet more energy luxury needs. This rebound effect is far less desirable as it consumes public spending in the case of revenue-based incentives (tax cuts or straight monetary subventions) and increases the energy gap between households. However, the benefit related to energy performance of the housing stock is fair. Recent studies have shown that the rebound effect also varies depending on whether the substituted service is low-carbon intensive (estimated rebound in the UK of 12%), “behavior as usual” (34% rebound) or carbon intensive. The latter case even produces backfire effect (Druckman, 2011). Further research on this topic should be conducted to strengthen the idea that a transitory rebound effect that comes from very modest households is acceptable as long as policy measures are dedicated to the replacement of carbon intensive equipment to reduce both energy poverty and carbon emissions.

Our distortion score suggests that energy policy measures need to take income and other differences among households into consideration, as consumers’ response to changes in income and energy prices will differ according to their initial score, and thus take peculiar attention to the extreme score values. Different instruments dedicated to specific household groups would

probably be a more efficient strategy to overcome the increasing energy divide among households. For low score groups and fuel poor households, “off market” measures such as transfer payments and social benefits are more suited to help households improve their level of warmth and appliance usage in the most energy efficient way. On the contrary, where revenue incentives can generate free riding among high distortion score households, patrimonial incentives that integrate the energy performance into the house patrimonial “green value” appear to be an efficient way to trigger energy efficiency investment with no windfall or free-riding effect.

7. References

- Allibe, B., 2012. Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français : amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes. Paris, EHESS.
- Baker, P., Blundell, R., 1991. The Microeconomic Approach to Modelling Energy Demand: Some Results for UK Households. *Oxford Review of Economic Policy* 7(2), 54-76.
- Baker, P., Blundell, R., Micklewright, J., 1989. Modelling Household Energy Expenditures Using Micro-data. *Economic Journal* 99(397), 720-38.
- Belson, W.A., 1959. Matching and Prediction on the Principle of Biological Classification. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)* 8.2, 65–75.
- Blundell, R., Kristensen, D., Matzkin, R., 2014. Bounding quantile demand functions using revealed preference inequalities. *Journal of Econometrics* 179, 112–127.
- Braun, F.G., 2010. Determinants of households' space heating type: A discrete choice analysis for German households. *Energy Policy* 38, 5493–5503.
- Cavailhès, J., Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Hilal, M., Wavresky, P., 2011. Consommation d'énergie des ménages en France. Report, INRA and CNRS.
- Cayla, J.-M., Allibe, B., Laurent, M.-H., 2010. From Practices to Behaviors: Estimating the Impact of Household Behavior on Space Heating Energy Consumption. In *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. Pacific Grove, CA, United States. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00509187>.
- Cayla, J.-M., Maizi, N., Marchand, C., 2011. The role of income in energy consumption behaviour: Evidence from French households data. *Energy Policy* 39, 7874–7883.
- Charlier, D. 2015. Energy Efficiency Investments in the Context of Split Incentives among French Households. *Energy Policy* 87 (C), 465–79.
- Chitnis, M., Sorrell, S., Druckman, A., Firth, S.K., Jackson, T., 2014. Who rebounds most? Estimating direct and indirect rebound effects for different UK socioeconomic groups. *Ecological Economics* 106, 12–32.
- DECC, 2013. Fuel Poverty Report: Annual Report on Statistics 2013. Department for Energy and Climate Change. Available at: <http://www.decc.gov.uk>.

- Devalière, I., Briant, P., Arnault, S. 2011. La précarité énergétique : avoir froid ou dépenser trop pour se chauffer. INSEE Première, May, n°1351.
- Doyle, P., 1973. The use of automatic interaction detector and similar search procedures. *Operational Research Quarterly* 24(3), 465-467.
- Druckman, 2011. Missing carbon reductions? Exploring rebound and backfire effects in UK households. *Energy Policy* 39, 3572–3581.
- Druckman, A., Jackson, T., 2008. Household energy consumption in the UK: A highly geographically and socio-economically disaggregated model. *Energy Policy* 36, 3177–3192.
- Dubin, J., Miedema, A., Chandran, R., 1986. Price Effects of Energy-Efficient Technologies: A Study of Residential Demand for Heating and Cooling. *Rand Journal of Economics* 17(3), 310-325.
- Greening, A.L., Greene, D.L., Difiglio, C., 2000. Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey. *Energy Policy* 28, 389–401.
- Guerra Santin, O., Itard, L., Visscher, H., 2009. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings* 41, 1223–1232.
- Haas, R., Biermayr, P., 2000. The rebound effect for space heating Empirical evidence from Austria. *Energy Policy* 28, 403–410.
- Hassett, K.A., Metcalf, G.E., 1993. Energy conservation investment: Do consumers discount the future correctly? *Energy Policy* 21, 710–716.
- Haughton, D., Oulabi, S., 1993. Direct marketing modeling with CART and CHAID. *Journal of Direct Marketing* 7, 16–26.
- Hausman, J.A., 1979. Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables. *The Bell Journal of Economics* 10, 33.
- Hills, J., 2012. Getting the measure of fuel poverty: final report of the Fuel Poverty Review.
- Jamasb, T., Meier, H., 2010. Household Energy Expenditure and Income Groups: Evidence from Great Britain. *Cambridge Working Papers in Economics* 1011, Faculty of Economics, University of Cambridge.

- Jamasb, T., Meier, H., 2011. Energy spending and vulnerable households. Cambridge Working Papers in Economics, Faculty of Economics, University of Cambridge.
- Kass, G.V., 1980. An exploratory technique for investigating large quantities of categorical data. *Applied Statistics* 29(2), 119-127.
- Khazzoom, J.D., 1980. Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances. *The Energy Journal* 1, 21–40.
- McCarty, J.A., Hastak, M., 2007. Segmentation approaches in data-mining: A comparison of RFM, CHAID, and logistic regression. *Journal of Business Research, Consumer Personality and Individual Differences* 60, 656–662.
- Meier, H., Jamasb, T., Orea, L., 2013. Necessity or Luxury Good? Household Energy Spending and Income in Britain 1991-2007. *Energy Journal* 34 (4), 109-128.
- Meier, H., Rehdanz, K., 2010. Determinants of residential space heating expenditures in Great Britain. *Energy Economics* 32, 949–959.
- Messenger, R., Mandell, L. 1972. A modal search technique for predictive nominal scale multivariate analysis. *Journal of the American Statistical Association* 67(340), 768-772.
- Morgan, J.N., Messenger, R.C., 1973. THAID a sequential analysis program for analysis of nominal scale dependent variables. Ann Arbor, Survey Research Center, Institute for Social Research, University of Michigan.
- Morgan, J.N., Sonquist, J.A., 1963. Problems in the analysis of survey data, and a proposal. *Journal of the American Statistical Association* 58, 415-435.
- Murray, C.K., 2013. What if consumers decided to all “go green”? Environmental rebound effects from consumption decisions. *Energy Policy* 54, 240–256.
- Nesbakken, R., 2001. Energy Consumption for Space Heating: A Discrete–Continuous Approach. *The Scandinavian Journal of Economics* 103, 165–184.
- Parti, M., Parti, C., 1980. The Total and Appliance-Specific Conditional Demand for Electricity in the Household Sector. *The Bell Journal of Economics* 11, 309.
- Preston, I., White, V., Katharine, B., Hirsh, D., 2014. Fuel Poverty. A Rapid Evidence Assessment for the Joseph Rowntree Foundation. Centre for Sustainable Energy. Reg charity 298740, Bristol, UK.
- Rehdanz, K., 2007. Determinants of residential space heating expenditures in Germany. *Energy Economics* 29, 167–182.

- Ritschard, G., 2010. CHAID and Earlier Supervised Tree Methods. Research Papers 2010.02, Institute of Economics and Econometrics, Geneva School of Economics and Management, University of Geneva.
- Roberts, D., Vera-Toscano, E., Phimister, E., 2015. Fuel poverty in the UK: Is there a difference between rural and urban areas? *Energy Policy* 87, 216-223.
- Sonderegger, R.C., 1977. Movers and stayers: the resident's contribution to variation across houses in energy consumption for space heating. *Energy and Buildings* 1, 313–324.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J., 2008. The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics* 65, 636–649.
- Thomas, B.A., Azevedo, I.L., 2013. Estimating direct and indirect rebound effects for U.S. households with input–output analysis. Part 2: Simulation. *Ecological Economics* 86, 188–198.
- Thomson, H., Snell, C., 2013. Quantifying the prevalence of fuel poverty across the European Union. *Energy Policy*, Special Section: Transition Pathways to a Low Carbon Economy 52, 563–572.
- Vaage, K., 2000. Heating Technology and Energy Use: a Discrete/Continuous Choice Approach to Norwegian Household Energy Demand. Department of Economics, University of Bergen No. 214.
- Van Diepen, M., Franses, P.H., 2006. Evaluating chi-squared automatic interaction detection. *Information Systems* 31, 814–831. doi:10.1016/j.is.2005.03.002
- Wilke, U., Haldi, F., Scartezzini, J.L., Robinson, D., 2013. A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities, *Building and Environment* 60, 254-264.
- Wyatt, P., 2013. A dwelling-level investigation into the physical and socio-economic drivers of domestic energy consumption in England. *Energy Policy* 60, 540–549.

8. Appendices

8.1. Cluster tree variable selection using ordered logit regression analysis

Survey: Ordered logistic regression					F(13, 25991)	764.71
Number of observations		26 004			Prob > F	0.0000
Dependent variable : energy effort rate decile	Coefficient	Linearized Std. Error	t	P> t	[95% Confidence Interval]	
Climate zone	-0.108	0.015	-7.04	0.000	-0.138	-0.078
Access to gas network dummy	0.646	0.031	20.70	0.000	0.585	0.707
Unconventional fuel dummy	0.623	0.033	18.73	0.000	0.557	0.688
Income quintile	-1.160	0.015	-78.72	0.000	-1.189	-1.131
Dwelling type	1.679	0.039	42.91	0.000	1.602	1.756
Urban zone (from rural to very urbanized)	-0.094	0.012	-8.16	0.000	-0.117	-0.072
Building construction date	-0.049	0.008	-6.34	0.000	-0.064	-0.034
Household family type	-0.092	0.010	-9.37	0.000	-0.112	-0.073
Tenure	-0.029	0.014	-2.08	0.038	-0.056	-0.002
Occupancy duration	-0.064	0.014	-4.55	0.000	-0.091	-0.036
Age of representative (quintile)	-0.057	0.014	-3.94	0.000	-0.086	-0.029
Profession	-0.003	0.004	-0.75	0.452	-0.010	0.005
/cut1	-3.652	0.137	-26.71	0.000	-3.920	-3.384
/cut2	-2.550	0.135	-18.85	0.000	-2.815	-2.285
/cut3	-1.751	0.135	-13.01	0.000	-2.014	-1.487
/cut4	-1.093	0.134	-8.15	0.000	-1.356	-0.830
/cut5	-0.454	0.133	-3.41	0.001	-0.715	-0.193
/cut6	0.187	0.133	1.41	0.159	-0.073	0.448
/cut7	0.864	0.133	6.51	0.000	0.604	1.124
/cut8	1.654	0.133	12.41	0.000	1.393	1.915
/cut9	2.770	0.135	20.53	0.000	2.506	3.035

Note: "/cut i " ($i = 1, \dots, 9$) represents the set of cutpoints. F is the Fisher test of global significance of the regression.

8.2. Market mapping and distortion score

8.2.1. Households living in houses

<i>Houses</i>		<i>Annual Energy Expenditures (median)</i>	<i>Median total Income</i>	<i>Energy Effort Rate</i>	<i>Weigthed Energy expenditures</i>	<i>Size in population</i>	<i>Intensity factor</i>	<i>Income/median</i>	<i>Energy Efficiency Distortion Score</i>
Electricity Exclusive mix	E1- Fuel Poor	1 200 €	11 685 €	10.7%	10.8 €	1%	0.71	0.33	0.23
	E2	1 310 €	20 151 €	6.7%	9.6 €	2%	0.77	0.57	0.44
	E3	1 400 €	30 386 €	4.6%	6.1 €	2%	0.82	0.86	0.71
	E4- Rich Sober	1 588 €	42 223 €	3.7%	5.4 €	2%	0.93	1.20	1.12
	E5 - Rich Sober	1 639 €	65 000 €	2.3%	4.5 €	3%	0.96	1.84	1.77
	E6- Rich Sober	1 283 €	42 228 €	3.1%	4.3 €	1%	0.75	1.20	0.90
Mixed Gas heated HH	G1- Fuel Poor	1 480 €	12 140 €	12.5%	13.1 €	1%	0.87	0.34	0.30
	G2	1 410 €	20 236 €	7.2%	9.0 €	1%	0.83	0.57	0.48
	G3	1 670 €	29 528 €	5.7%	8.2 €	3%	0.98	0.84	0.82
	G4	1 750 €	42 458 €	4.2%	6.5 €	3%	1.03	1.20	1.24
	G5-HIHC	2 000 €	65 955 €	2.9%	5.4 €	4%	1.18	1.87	2.20
	G6	1 634 €	20 521 €	8.1%	12.2 €	1%	0.96	0.58	0.56
Mixed Unconventional fuel	U1- Fuel Poor	1 620 €	12 000 €	14.4%	12.9 €	3%	0.95	0.34	0.32
	U2	1 600 €	20 423 €	7.9%	9.9 €	5%	0.94	0.58	0.54
	U3	1 574 €	29 738 €	5.3%	9.2 €	2%	0.93	0.84	0.78
	U4	1 725 €	42 400 €	4.1%	4.3 €	3%	1.01	1.20	1.22
	U5- HIHC	2 110 €	65 469 €	3.0%	6.0 €	3%	1.24	1.86	2.30
	U6- Fuel Poor	1 307 €	12 003 €	12.1%	11.3 €	1%	0.77	0.34	0.26
	U7	1 920 €	29 153 €	6.5%	9.9 €	3%	1.13	0.83	0.93
	U8	1 475 €	30 330 €	4.9%	5.7 €	1%	0.87	0.86	0.75
	U9	1 860 €	30 561 €	6.1%	4.5 €	1%	1.09	0.87	0.95
	U10	1 800 €	42 320 €	4.3%	6.8 €	3%	1.06	1.20	1.27
	U11	1 970 €	41 203 €	4.9%	8.9 €	2%	1.16	1.17	1.35
	U12- HIHC	2 422 €	62 068 €	3.7%	8.4 €	1%	1.42	1.76	2.50

	U13-HIHC	2 050 €	63 625 €	3.1%	4.3 €	3%	1.21	1.80	2.17
	TOTAL HOUSES	1 701 €	35 285 €	4.8%	7.0 €	57%	1.00	1	1
	Total houses electric	1 460 €	36 650 €	4.0%	5.8 €	11%	0.86	0.86	1.04
	Total houses gas	1 737 €	36 303 €	4.8%	7.5 €	14%	1.02	1.02	0.99
	Total houses unconventional	1 800 €	34 447 €	5.0%	7.1 €	31%	1.06	1.06	0.95

8.2.2. Households living in flats

		<i>Annual Energy Expenditures (median)</i>	<i>Median total Income</i>	<i>Energy Effort Rate</i>	<i>Size in population</i>	<i>Intensity factor</i>	<i>Income/median</i>	<i>Energy Efficiency Distortion Score</i>
Energy Effort Rate groups in Flats	1- Fuel Poor in flats 2 (44%)	600 €	9 422 €	7.4%	3%	0.83	0.41	0.34
	2	900 €	19 837 €	4.5%	2%	1.25	0.86	1.08
	3	980 €	29 325 €	3.3%	2%	1.36	1.27	1.73
	4 - HIHC	889 €	40 888 €	2.1%	2%	1.23	1.77	2.19
	5 - HIHC	963 €	65 259 €	1.3%	6%	1.34	2.83	3.79
	6 - Poor Sober	680 €	12 008 €	6.4%	2%	0.94	0.52	0.49
	7- Fuel Poor in flats 3 (41%)	720 €	10 195 €	7.5%	3%	1.00	0.44	0.44
	8- Fuel Poor in flats 1 (48%)	541 €	9 521 €	6.4%	3%	0.75	0.41	0.31
	9	600 €	19 769 €	3.0%	5%	0.83	0.86	0.71
	10	779 €	20 269 €	3.8%	1%	1.08	0.88	0.95
	Sober Solos	700 €	19 783 €	3.6%	3%	0.97	0.86	0.83
	12 - Rich Sober	600 €	28 941 €	2.1%	4%	0.83	1.26	1.05
	13	900 €	29 639 €	3.1%	1%	1.25	1.29	1.61
	Sober Solos	727 €	28 360 €	2.6%	1%	1.01	1.23	1.24
	15 - Rich Sober	700 €	41 627 €	1.7%	3%	0.97	1.81	1.76
	16- HIHC	920 €	41 150 €	2.2%	2%	1.28	1.79	2.28
	17- Poor Sober	489 €	12 157 €	4.7%	1%	0.68	0.53	0.36
	TOTAL FLATS	720 €	23 043 €	3.1%	43%	1.00	1.00	1.00

9. Poster

Beyond average energy consumption in the French residential housing market: a household classification approach to assess rebound effect uncertainty

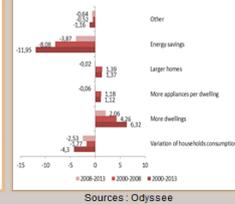
Deborah Leboullenger^{1,2,3}
Emmanuel Hache², Valérie Mignon³

¹ BPCE-SA Banque Populaire Caisse d'Épargne Paris, France
² IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison, France
³ Economix, Université Paris Ouest La Défense, Nanterre, France

1. Context : Why are we interested in household energy consumption?

- Household housing consumption accounts for almost 30% of final energy consumption in France and most European countries. It is a key driver for low-carbon energy transition
- The main objective of the present work is to find out how to lower energy consumption without having to contradict energy habits and usages in dwellings nor ignore heterogeneity in households preferences

Figure 1: Drivers of households energy consumption variation in France



2. Paper postulates and main hypothesis

- Hypothesis 1:** Energy Policy measures should use disaggregated households consumption methods instead of average estimates to target effective energy efficiency leverages in housing. Group classification helps for example to identify and separate households groups that need public intervention (fuel poverty) from groups that are "in the market" for energy efficiency private investments.
- Hypothesis 2:** Household group analysis helps to build easy to compute and practical finance tools for investors and liquidity providers to reduce rebound effect uncertainty. It is the first step to evaluate and finance energy savings private investments and lower energy efficiency gap.

3. Definitions

Rebound Effect: The "take-back" or "rebound effect" refers to an increase in the supply of energy services with a corresponding decrease in the effective price, the size of which depends upon the underlying cost structure (Greening et al., 2000).

Fuel Poverty: "a person is to be regarded as living "in fuel poverty" if he is a member of a household living on a lower income in a home which cannot be kept warm at reasonable cost"

Price or income variation	Demand Variation	Type of good	Application to the energy demand
Direct price increase	Demand for good decreases (negative elasticity)	Normal good	When gasoline price increases, people tend to travel less.
Indirect price increase (price of good \geq increases)	Demand for good increases (positive elasticity)	Either Giffen (inferior but necessity good) or Veblen (symbolic or snobism effect)	Veblen effect for holidays electric lights during winter or outside Jacuzzi on French ski stations
Income increases	Demand for good increases more than proportionally	Goods \geq and \leq are complementary goods	Individual car and gasoline
Income decreases	Demand for good is unchanged	Goods \geq and \leq are substitutable goods	Heating fuel type: electricity and gas; coal fuel and wood
	Demand for good \geq decreases	Good \geq and \leq are independent	Can apply, to some extent, to some good that doesn't need energy to be used (ex. chocolate)
	Demand for good \leq increases less than proportionally	Good \geq is a luxury good	People tend to heat larger homes when their income increase
	Demand for good \leq decreases	Good \leq is an inferior good	When households change their old washing machine or boiler.
	Demand for good \leq is unchanged	Good \leq is a constrained/necessary good	Heating a room adequately (at a healthy level)



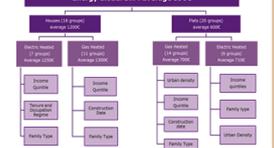
4. Methods and Results

Chi Square Automatic Interaction Detection (CHAID) method developed by Kass (1980) analyzes with "tree growing" techniques the annual energy expenditures of French households in the residential sector.

Figure 2: CHAID Algorithm. Kass (1980)



Figure 3: Results for French households energy expenditures



5. Applications

A) Market mapping

The energy efficiency market can be divided in four parts, with from left to right an income-based segmentation and from top to bottom an energy use intensity-based segmentation. Bottom left households are suitable candidates for "transfer" policy measures whereas top right households are "in the market" for energy efficiency investments.

B) Pen Portraits

"High income High Consumption" (HIHC) households (11% of survey sample) combine very low energy effort rate (1.55%-1.65%) due to a very high income (Q5) and energy expenditures above average (+20-40%). They are couple or single households that live in big surfaces in middle to high urban density.

"Fuel Poor households" have energy effort rate >10 due integrally to a very low income (Q1) as they have median energy cons. They are retired owners of rural old houses or rent electricity heated rural flats.

C) Energy efficiency Score

The energy efficiency distortion score is a synthesis of two effects: intensity and revenue, calculated on homogeneously distributed households. Relative to the two median groups in houses and flats, half of the groups are expected to have a positive rebound effect on energy efficiency measures (19 groups), and the other half is expected to embrace energy efficiency measures on their homes with positive attitude or even windfall behaviour such as HIHC households' groups especially in flats.

Figure 4: Market Mapping for energy efficiency measures in houses

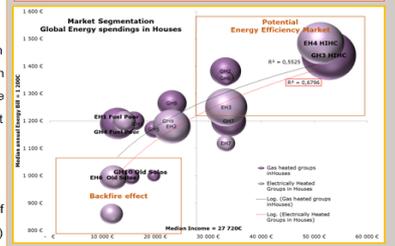
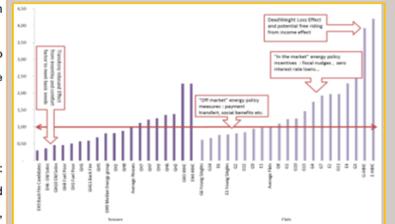


Figure 5: Energy Efficiency Distortion Score



6. Setbacks and Future work....

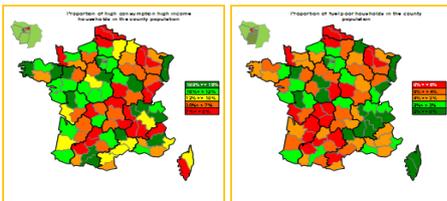
Limits: With this method, household energy consumption in flats is still a mystery (not clearly driven by revenue or comfort). Price variations are not investigated.

Next: Implement rebound or intensity scores with current energy retrofit loan demands (operational validation)

Create price and revenue sensitivity relative to energy consumption group using pseudo-panel data (to be constructed in France)

Combine rebound effect estimates with other hidden cost and benefits (like property green value) to assess the "fair price" for energy retrofit investment return (and utility) in private housing.

Bonus: Regional Analysis



7. Going further

What is the role of finance and financial intermediaries in the energy transition? What if there were a carbon implicit price and what if it could emerge from financial markets?



CHAPTER 2. GREEN PROPERTY VALUE IN THE FRENCH RESIDENTIAL HOUSING SECTOR

This chapter is based on a paper jointly written with F. Lantz and C. Baumont, published as part of a collective report on the relationship between Energy, Housing and Territories in France sponsored by the CFE (Conseil Français de l’Energie – French branch of the WEC – World Energy Council). It has been presented at the Young Energy Economists and Engineers Seminar (YEEES) at the University of Edinburgh in November 2016.

Abstract

Revealing the presence of a market value for energy performance in the private residential sector can trigger investment in energy retrofits. This chapter aims to do so by using an original approach that departs from hedonistic regressions. We model an efficiency frontier using both semi-parametric and stochastic methods to test if property price inefficiency can be explained by energy performance. We show that, once we account for spatial dependencies that rule over the housing market, we find evidence for energy performance's market value between 1% and 3% for A, B or C rated property goods in the collective dwelling's market. In terms of cost-benefit analysis, the housing green property value accounts for only part – that is between 4.6% (in houses) and 6.6% (in collective dwellings) - of the real terms investment in energy retrofit. Although the very presence of market “green” premium is robust to the specification of the efficiency frontier; its magnitude varies whether we use parametric or semiparametric inference. We find higher green property value with maximum likelihood estimator than with DEA (Data Envelopment Analysis). The results are also robust to the specifications used for the second stage estimation of price inefficiencies as it is the subject to a vivid debate. We interpret our findings with regard to the role of heterogeneity between private and social housing stock and local housing market fundamentals that affects the dynamics of energy performance investments.

1. Introduction

Energy efficiency is a key pillar for a successful low carbon energy transition especially in the domestic sector. In France, the housing stock represents 30.2%³⁸ of final energy consumption and 21% of national GHG emissions.

Under the energy transition law ratified in August 2015 that follows the Grenelle 1 law of 2005, France sets itself the objective to engage in 2017 and onwards in 500 000 yearly building renovations divided into two third for the private housing stock and one third for social housing stock. French government chooses to prioritize two aspects: the renovation of least efficient buildings and the reduction of fuel poverty. The final objective is to reduce the number of fuel poor households by 15% by 2020. By 2025, all the building stock that consumes more than 330 kWh per m² and per year—that is F and G energy labelled dwellings— must be retrofitted and half of them must belong to fuel poor households. This objective is very ambitious for two reasons.

First, the renovation rate remains low in European countries despite the low-carbon transition objectives. In a recent simulation of the housing stock dynamics, Sandberg et al. (2016) show only minor future increases in the renovation rates across all 11 countries (between 0.6–1.6%), falling short of the 2.5–3.0% renovation rates that are assumed in many decarbonisation scenarios. France makes no exception. According to the data collected by the *Plan Bâtiment Durable*³⁹ and the OPEN surveys, the renovation targeted rate of 500 000 buildings a year is far reached since 2011 with only 288 000 private buildings retrofitted in 2014. Furthermore, the renovation rate has been declining both in value and volume by respectively 2.5% and 8.5% between 2011 and 2013. The energy retrofit market is mostly driven by the social housing market that is already achieving a large part of the 2017's goal with 105 000 energy retrofits achieved in 2014.

Second, a large proportion of the global retrofit market does not include energy efficiency measures or if they do, they don't always sufficiently improve the building's energy performance. In fact in 2013, only 32% of the retrofit market concerns energy significant improvements. Only 60% of wall retrofits and 45% of roof retrofits integrates energy efficient insulation features (Table 7).

³⁸ 68Mtoe (or 740 TWh)

³⁹

http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/plan_batiment_durable_rapport_nouvelles_dynamiques_de_renovation_des_logements.pdf

TABLE 7. RETROFIT MARKET IN FRANCE

	2010	2011	2013	2014 ⁴⁰
Full Housing Stock	33 500 000	33 850 000	34 500 000	35 000 000
Retrofit Market Value and Volume	38.4 bn€/6 500 000	38.5 bn€/7 700 000	40 bn€/9 700 000	35 bn€
Energy Retrofit Market Value/Volume	14 200 M€/2 400 000	13 500 M€/2 500 000	12 800 M€/2 600 000	3 500 000
Average spending per energy retrofitted housing	6 410€	5 330€	5 210€	10 000€
Deep energy retrofit Volume and Investment per dwelling	295 000	290 000	265 000	288 000 25 400€

SOURCES : OPEN SURVEYS 2011, 2013, 2015

Private investment in energy retrofit is driven by the willingness to invest in energy efficiency which is so far under its fair value worldwide. The main reason is there are constraints and hold-ups for an investment in energy retrofit that together formalize the well-known concept of **energy paradox or energy efficiency gap**. There is an investment gap, or deficit, when initial investment does not occur even for high return rate (or when the resulting cash flows outreach the initial investment). This phenomenon is salient in the context of energy efficiency and has been first mentioned by Jaffe and Stavins (1994).

Usual neoclassical explanations for energy efficiency gap involve measurement errors of investment' cash flows and discount rates that create a spread between expected and realised gains. The gap arises from hidden costs (search or transaction costs), preferences' heterogeneity (about constraints, comfort and environmental values), uncertainty and risk aversion about price or rebound effect, and unexpected high implicit discount rates. Investment decision can be postponed or cancelled if there is a gap between predicted and realized energy efficiency gains, because normative calibrated models do not take into account the household disaggregated rebound effect as shown in chapter one. The overestimation of energy mass retrofits and intensity « take back » factor can offset up to 20% of energy efficiency gains estimations which translate to an increased return span (Cayla et al., 2011; Allibe, 2012). Risk perception and implicit discount rate are also of great importance in residential housing private investment decisions. When households choose

⁴⁰ OPEN study changed the survey so that it cannot be fully compared to the previous editions. For 2015 edition, no distinction is made between retrofit and energy retrofit market.

their residence, they make a long-term and locked-in investment decision. Housing represents more than two third of average household wealth (62.6% on average) but it goes up to 75% for households aged more than 60 (Insee 2015). Residential mobility has decreased in France over years since 2000 and considerably reduces with the household age. Mobility rate is only 3.5% for landlords (Insee Housing Survey 2013).

Evidences on undervaluation of cash flows have been searched, mostly in the US (Gillingham and Palmer, 2014) but none of them could explain 100% of the actual investment gap. Hence, behavioural economics has lately enlightened the literature with other possible explanation involving consumers' behavioural anomalies and failures. Information theory instigated by the works of G. Akerlof, M. Spence and J.E. Stiglitz tells us that the energy efficiency gap can also spawn from information asymmetries, technology spill-overs, negative externality (free rider problem and tragedy of commons) but also moral hazard due to split incentives. The energy efficiency market bears principal-agent problem generated by a "split incentive" resulting a sub-optimal outcome and a subsequent lack of investment. It occurs when the energy gain investment decision and the energy use outcome is split between to agents whose interest and incentives differ, or even contradict. This scenario tends to happen typically between owners and tenants in the residential housing market. The "landlord-tenant dilemma" is confirmed by a significative difference in the willingness to invest in energy efficiency by (Michelsen et Kholodilin, 2015). (Krishnamurthy et al., 2015) also find evidence of the "split incentive" phenomenon between owners and renters for short-term and energy gain investments that require demand-side management such as light bulbs, heat thermostat and insulation. Although they find no differences between owned and rented housing for relatively immobile and upside energy retrofits such as wind turbines and ground source heat pumps,

In order to close up or at least to narrow the energy efficiency gap, the present work tackles the profitability issue in energy efficiency investment and aims to reveal the presence of a market value for energy performance in private housing sector. **The objective of this chapter is to investigate whether the price difference can be explained by energy performance information provided by certification labels. In other words we want to determine if private housing goods that are certified as energy performant (labels A, B or C) are sold at higher price and to introduce this value in a cost-benefit perspective for private energy efficiency investment.**

To answer this simple question, we have to deal with several conceptual issues that require unlocking three comprehension levels. First, the concept of “green property value” imprints in a broader context of energy efficiency in the housing sector. Second, any research on price in the housing sector must take into account spatial key factors to model prices. Third, the original estimation technique (efficiency frontier estimation) has specific properties specification, evaluation and robustness issues and limits that are assessed within this analytical framework.

The chapter is organized as follows; the next section presents a brief review of the literature that studies the potential value of energy performance in residential housing. Both efficiency frontier construction and price inefficiency analysis and methods are introduced, described and discussed in section 3. Data and results are presented in section 4 and we propose an empirical evaluation in section 5. We present our conclusions and recommendations in the final section.

2. Green Property value: definition and objectives

2.1. Green property value as an investment incentive

Green property value corresponds to the additional value generated by a good energy performance. This form of “good will” can be seen as the return on investment of energy efficiency upgrades. There is a broad spectrum of values households can get from making their homes more energy efficient. They come from three perspectives: a consumption-based perspective, a patrimonial-based perspective and a risk hedging perspective.

From the first one, homeowners enjoy savings from decreased utility bills and other lower expenses, and get further value from the joy and pride they get from living in a high performance, healthy, and comfortable home. The latter case is a determinant factor for energy efficiency investment. Furthermore, there is a strong potential demand for thermal comfort that an enhanced building performance can provide within a home. In 2013, more than 20% (5.6 million homes) of French households declare that their main residence had roof and/or walls thermal insulation problems, defaulted windows or water infiltration within their walls (INSEE Housing Survey 2013). From the patrimonial prism, investment in the housing quality and energy performance can also be incentivized by the increased rental or selling value, a lower vacancy rate or fiscal benefits. Several studies emphasize that investment decisions in energy efficiency are more often driven by potential rental or property income than energy cost savings (Hyland et al., 2013; Fuerst et al., 2015). Finally, if the buyer expects a rise in future energy related housing costs, she or he can choose a property good that minimizes those risks. For example, if either energy prices increase, a

carbon tax is implemented at the residential level, or a bonus/malus system that impacts properties that don't meet minimum efficient standards, then energy efficient houses will be cheaper all other things equal. Good energy performance in housing has intrinsic value thanks to both virtuous carbon footprint and low energy consumption in terms of value and risks. Energy performance certificates (DPE in France) or labels for housing, such as the low-consumption building label (BBC for *Bâtiment Basse Consommation* in France) first reduce the usage cost and trigger fiscal revenue from tax rebates or zero-rate loans. Moreover, they both reduce the risk of implementation of a carbon tax at the national or European level and the risk of increasing energy retail prices and construction thermic standards. Regarding renting market, lower energy charges and more comfort reduces vacancies and default rate from unpaid rents.

What we call the "green property value" is the discounted net present value of both operational and patrimonial value for energy efficiency in homes from a buyer's point of view. As consumers increase their understanding of the connection between energy upgrades and the value of their home, their monthly expenses, and their comfort, they will be more likely to upgrade their homes.

A Green property value can be a difficult piece of information to extract from the market. First, it is unobservable until the transaction process. In other words, for the "energy efficiency" market value to be revealed, the property must be evaluated and priced according to the current market's ability to reveal a "fair price". It can be seen in two ways: either property with good energy performance is sold at higher price on a comparable market or it is sold faster than other comparable properties (reduced vacancy rate). Second, housing specific energy performance requires information that takes time, money and expertise to acquire. Even if energy performance diagnosis is compulsory for the property to be sold in France since 2011, only 39% of the housing stock is displaying valid energy efficiency information (DINAMIC, 2015). On the bright side, information on energy performance of the French housing stock becomes more and more available (only 18% of the housing stock was covered in 2011). Third, property green value must emerge among homogeneous markets: the energy performance must be valued among goods with similar characteristics. The housing price model and specification are important because endogeneity and correlation in the residuals can create a bias towards or against the revelation of a green property value especially if it is small. Energy performance can be correlated with other general characteristics such as the general state and most of all the age of the property. Last but not least, the value is cannot arise where housing market is facing supply or demand constraints. Therefore energy performance is difficult to estimate in high densities areas like Paris and its suburbs, but also in areas where supply excess demand and prices adjust downwards. That being said, we must

bear in mind that our study is imprinted in a peculiar macroeconomic context for the national and regional French housing market. Indeed, the national housing market experienced a double decline of interest rates and selling prices in most regions except for Paris and its suburbs. Bourgogne and its main city Dijon, our area of interest, has not been an exception. Since 2012, housing prices have been falling in the area. Whereas it was relatively stable for new dwellings, the falling in prices has been more abrupt for old dwellings. Individual old dwellings fell by more than 3% a year between 2012 and 2014 (that is our covering period) on average and of around 2% for collective dwelling.

2.2. Green Property Value in the academic literature

A growing body of authors studied the impact of energy efficiency labels on the price of durable goods such as appliances, cars and finally in the residential sector. United States were one of the first countries⁴¹ to develop energy certification labels in the real estate sector. Two labels, Energy Star and Leadership in Energy and Environmental Design labels were created in respectively 1992 and 2000. China and Europe followed suit later with the creation of the European Energy Performance Certificate (hereafter EPC), and the Chinese Green Building Label (CGBL) in 2006 and 2008. Thanks to this seniority, most studies come from the United States that represent a third of the existing literature conducted on the residential sector⁴². One third comes from Europe and the last third from Asia continent. Existing studies find on average an increased market value for energy efficient homes of between 3.5% and 4.5% on average for the residential sector (by comparison green property value was estimated on average 13% for the tertiary sector). Appendix 7.1 gives a more detailed analysis of selected literature.

In the US, Griffin et al. (2009) used a hedonic model to test the market value for Energy Star and LEED labelled homes in Portland⁴³. They found a substantial market premium between 3% and 9.6% of the selling price and a reduction of vacancy rate by 18 days. Later Kahn and Kok (2014) found an incremental value for certified homes in the Californian housing market of 2.1% for the most conservative estimate (that is +\$8400 on average). They also underline that the premium offset the input cost for those buildings estimated at \$4000-\$10 000. In this chapter we also test if green property value in France can compensate part or all of the investment cost in energy efficiency. Our results are showed in the conclusion section.

⁴¹ Hong Kong developed the Building Environmental Assessment Method in 1996

⁴² We are using the results of the meta-analysis produced for the « *Energies et Territoires* » project in collaboration with LEDI and MSH, university of burgundy. Publication forthcoming (Fizaine, 2017)

⁴³ see Walls et al., 2013 for a literature review for the US market

In Europe, a pioneer study in the residential sector is provided by Brounen and Kok (2011) who analyses the effect of energy labels on housing prices in Netherlands. They found significant discounts and premiums on housing value of -5% to 10%. In 2013, the European Commission and DG Energy established a report of green value estimates for several cities across the EU. They found a price gap from 2% to 11% in market value and from 1% to 5% difference in renting value. All European main cities, except Oxford, carried price-premiums for one-letter improvement in EPC. Authors found an inverse relation with price in Oxford (price discount of 4%) they attributed to the sample size and the dwelling's age omission. Latest studies, like de Ayala et al. (2016), investigate the effect of energy labelling on housing prices using hedonic model with spatial dependences (they used city dummies). They found that ABC homes are priced 9.8% higher than D, E, F or G homes and ABCD labels have a 5.4% premium compared to EFG. In a recent paper, Claudy and Michelsen (2016) focus on the two-way relationship between regional housing market fundamentals, housing quality and residential energy consumption. They argue that energy consumption and motives to invest in energy efficiency measures are not solely derived from energy prices, investment costs, income levels and further socio-economic factors. In fact, regional housing market conditions (vacancy rate, housing price level and anticipated price change etc.) play an important role in the investment decision for more housing quality as properties are not only consumer goods but also and mostly capital assets.

In France, a survey conducted by DINAMIC (2013; 2015) gives quantitative estimations for property green value at the national level but controlled for climatic and spatial differences. DINAMIC studies used both hedonic model and spatial regression analysis to find positive correlation between prices and energy performance ranking according to geographical climate zones, habitable surface, total surface and other qualitative variables such as construction date and number of rooms (integrated as dummies). Depreciations and premiums from average energy rank (D label) range from -15% to 14% depending on climate zones. In 2013, DINAMIC studied the energy performance value using MCO simple regression analysis on a set of housing goods transactions in French province during the years 2010-2011. The report concluded that energy labels had a significant impact on transaction prices. Price difference could make a 30% added value between D and A and B labels or a depreciation between D and G labels. Unfortunately, the results suffered from a big uncertainty range because of the lack of energy label coverage and a high correlation with property good' general state and its energy label. The study therefore is concentrated on houses that have a good general state. In 2015, the authors investigate green property value for old dwellings transactions during the years 2012/2013. The study covers 520 000 properties in French province (2/3 of which are individual houses) and 170 000 Parisian

and Ile de France housing market (3/4 of which are collective dwellings). Data are from PERVAL (for provincial) and BIEN (Ile de France) notarial databases and cover respectively 55% and 75% of global French transactions. Since the 2011 study, although label repartition is relatively stable in time (A and B labels slightly increased) energy labels coverage has doubled from 20% to 40% and increases the robustness of the analysis.

Studies on the residential sector stress that housing location and dwelling's specificities have potential bias on the valuation for property green value (Kaufman, 2010; Brounen & Kok, 2009; DG Energy, 2011; Bruegge et al., 2016; DINAMIC 2013). First there is a gentrification effect because green certifications are more numerous in city centres. Second because very dense urban zones have specific price and market characteristics, their appeal may create failures on the housing market. The introduction of spatial factors, especially a distance vector to the city centre can control for that aspect. Third, there is a mechanical distinction between newly constructed and old dwellings because the first create automatic green certification when the market is regulated by construction norms as it is the case in France since 1974. Those markets must be therefore analysed separately which is our case as the buildings constructed in 2013 and onwards are identified with the highest rank in their energy performance certification. Fourth, there seems to be a complex relationship between green value and the dwelling's age in some areas. Some would say that it is because there is an unobserved value for old buildings for historical and aesthetic purposes (DG Energy), others argue that it is because green certification improves over time and new buildings create obsolescence on the green value for the second most recent buildings (Bruegge et al., 2016).

3. Methodology

Almost all of the “green property value” literature relies on hedonic regressions. Hedonic models, first described by Rosen (1974) take housing price as the sum of its characteristics vectors. The novelty of this chapter is that we depart from this approach and develop an optimization technique that takes housing price as a performance indicator. We perform a two-step efficiency analysis of the housing price. First we calculate an output-oriented efficiency score that define the housing selling price as combination of several first-order characteristics (surface and localisation). Second we compare each observation and the efficiency score they obtained to the optimal frontier composed by the “best in class” points of the dataset. The distance is as a measure of inefficiency that can determine whether energy performance, along with other qualitative housing

characteristics, could explain price inefficiency. That is the price gap between two observations that share the same characteristics, one being closer to the efficiency frontier than the other.

3.1. Efficiency frontier analysis

Measuring productive efficiency, initially called “activity analysis” started in the early 1950s with the pioneering works of Debreu (1951), Koopmans (1951) and Farrell (1957). It became a subject of interest in many economic sectors. It first concerned industry and finance businesses that want to optimize their production function in selecting the most productive way to produce the output y with a set of inputs x . The classical formulation of this problem is to consider a vector of inputs $x \in \mathbb{R}_+^p$ producing a vector of output $y \in \mathbb{R}_+^q$. The combination of all input-output pairs such that x can produce y is called the set of production possibilities, P . The comparison of production means (pairs of input x and output y) is made by means of an efficiency frontier, estimated to be the upper boundary of P ⁴⁴.

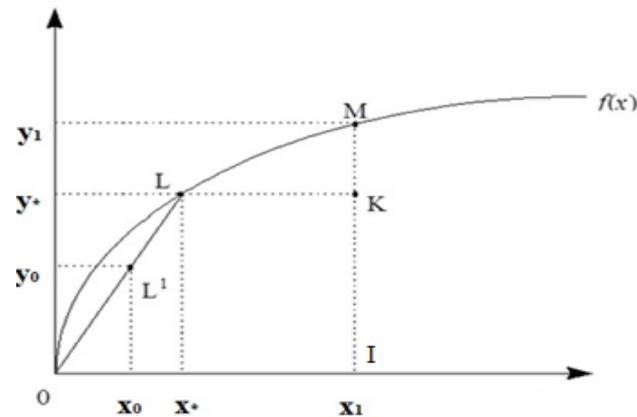
We consider a frontier production function which gives the maximum level of production y from an input x . Thus, for a given amount of x , we could have a level of production lower or equal to:

$$y^b = f(x)$$

By considering the actual production y and the corresponding amount of input x , we derive the productivity of factor x , then its marginal productivity. For comprehensive purpose, we can consider three different combinations of input x and output y are represented on Figure 14. Efficient observations are illustrated by the points L and M from the combinations (x^*, y^*) , (x_1, y_1) . Inefficient observations use either not enough (point L' at (x_0, y_0)) or too much input factors (points I and K) yielding suboptimal output. We consider efficiency as a measure of the distance between those observation points and the frontier.

⁴⁴ See Färe (1988). P requires to follow three assumptions 1) P is closed, i.e. It contains its boundary, 2) there is “no free lunches”, that is the production requires positive inputs and 3) there is free disposability of inputs and outputs, which is equivalent to say that there is monotonicity of the technology (Simar & Wilson, 2011).

FIGURE 14. FRONTIER FUNCTION ILLUSTRATIVE EXAMPLE



SOURCES: SIMAR (2012)

There are several approaches to model efficiency frontier (Table 8). One can choose to model a deterministic or a stochastic frontier. One also can choose the underlying probability model to be either parametric or non-parametric based on the functional form and the specification of the production set P . Deterministic frontiers are determined as follows:

$$Prob \{(x_i; y_i) \in P\} = 1, \text{ for } i = 1, \dots, n.$$

It means that those models find the estimator that envelops at best the cloud of data points and the distance to the frontier is considered as pure inefficiency. Those models are thus very sensitive to outliers and it is difficult to distinguish inefficiency from noise or random shock to the data. To control for this aspect, we make sure that the dataset we use does not contain such outliers in terms of price and characteristics (price per m^2 or given their distance to focal points).

Stochastic frontiers on the other hand allow data to have random noise that may not be in the production set P and distance to frontier has two components: the noise and the inefficiency. We see that those estimations pose identification problems and need more assumption if we want to further analyse inefficiency. In parametric models, assumption on the probability model, that is the functional form (Cobb-Douglas, Translog...) and the distribution law (Normal, Gamma, Exponential...) of the production frontier, are completely specified. It gives the possibility to use standard estimation methods and easy economic interpretation of the estimators (as elasticities). However it implies that the function describing the production set is known and fully specified.

Nonparametric approach makes no such assumption on the probability model of P but economic ones (free disposability, convexity, return to scale, “no free lunches”). It is more robust to model choice and handles more easily multiple input cases (Darario & Simar, 2007).

TABLE 8. INFERENCE SUMMARY FOR CHOSING A MODEL

INFERENCE	Parametric : assumptions on frontier function (shape, density, and distance) and DGP	Nonparametric : No analytical assumptions, (only economic)
Deterministic : Finds the estimator that fits the best the cloud of data points Second stage : distance to frontier is pure inefficiency	Analytical model for frontier and DGP $F(x,y)$ Example: estimators COLS, MOLS, MLE + shape of the frontier : Cobb-Douglas, Translog, probability law for u_i	No specific model for frontier or probability law Example : FDH, DEA (convex FDH)
Stochastic : Allows for noise and random shocks Second stage : distance to frontier has two components : noise and inefficiency	Analytical models for frontier and $F(x;y)$ including noise. Examples : OLS, MOLS, COLS, MLE + assumptions on probability law of e_i (noise)	No specific model for frontier and for $F(x;y)$ including noise (some structure of the noise must be applied) Example: SFDH, SDEA

SOURCES: SYNTHESIS TABLE FROM AUTHOR (BASED ON SIMAR, 2012)

We rely on the deterministic, semi-parametric Data Envelopment Analysis (DEA) technique first used by Farrel (1957). These estimators are solutions of a linear program and require free-disposability and convexity as opposition to FDH (Free Disposal Hull) estimators developed by Deprins, Simar & Tulkens (1984) that do not require convexity. We assume that the frontier is determined by the relationships between the “best” extreme observations in terms of combination between input and output. In this optimization problem, we do not assume any scale effect of output (y) depending on the input (x). This means that there is no specific shape of the frontier.

3.2. Apply efficiency frontier estimation to model housing market prices

When applying the efficiency frontier approach to a specific market, one must make sure that the properties of the estimation chosen fit the modelisation features of chosen field in which we implement it. To put it differently, are efficiency frontiers a good analytical and inference tool to model housing prices?

The frontier function approach must take into account spatial correlations in the frontier estimation. To determine the frontier inputs, we rely on the idea that housing price observe a

localization rent that is determined by the concentric effect of an urban area on prices and the arbitrage that is made in terms of first based cost : that is the habitable surface. We based this idea on the adaptation on the residential housing market made by (Alonso, 1964) and (Muth, 1969) of the localization rent in agricultural production developed by Van Thünen. The combination (x^*, y^*) corresponds to the highest sells on the market at that time given their set of inputs. Points that locate under the frontier are said to be inefficient in terms of decision units (output obtained from the combination of surface and localization inputs). To introduce the impact of spatial factors, we include a localization matrix in the efficiency frontier determination. Following Baumont (2004) we use two types of location variables as spatial vectors: the distance to the city centre⁴⁵ and the minimum distance to twelve identified districts located in both Dijon city and urban area we will refer further on as “disadvantaged districts” (DD) as they have been selected by their high proportion of social housing and because they are part of an urban rehabilitation policy program. The construction of localisation vectors is further described in the data section.

A choice must then be made regarding the frontier estimation method and the specification that fits best the housing market characteristics. Moreover, when one wants to account for spatial factor in the price model, the best method is to incorporate nonparametric part in the model that allows sufficient flexibility to find substantial spatial variation in house values. Housing economics academic literature most argue in favour of nonparametric or semi-parametric price regressions as they provide more accurate housing price predictions than conventional parametric models (Anglin and Gençay, 1996; Meese and Wallace, 1991). The prediction errors from the semi-parametric model are smaller than those from the parametric models by roughly 10–20% (Bin, 2004). Unlike standard parametric spatial models, this combination of functional form flexibility and spatially varying coefficients helps to reduce spatial autocorrelation without imposing arbitrary contiguity matrices or distributional assumptions on the data (Clapp et al., 2002).

3.3. Measures for price inefficiency in a 2-step approach

Our objective is to investigate whether the price difference can be explained by energy efficiency. In other words, we aim at assessing whether with the same amount of input, housing goods that are energy performant (ranked A, B or C in energy consumption) are sold at higher price. We choose to use both parametric and nonparametric approaches for the frontier function and compare them in the results section.

⁴⁵ Our data have localization information in the form of Lambert2 coordinates (x, y) that we convert in meter distance, from Dijon city center located “place Darcy”. This center point extracted from google maps in GPS coordinates was then converted in Lambert2 coordinates using the Moran index and the calculator from the website Geofree⁴⁵.

To model transaction prices in the residential sector, we choose a formalization following Orea, Llorca, and Filippini (2014) of a two-step price setting frontier function:

$$Price = F(S, L, E, X, \gamma)e^u$$

Home prices are expressed as a function of independent variables reflecting an arbitrage between surface (S), localisation (L), and qualitative characteristics expressed by discrete variables such as energy performance (E) and other housing main characteristics (X) such as the presence of parking and outdoor facilities, the general state, the construction period etc. γ is the coefficients' vector associated to the sets of discrete variables (E and X sets) and u is the error term.

If the price setting function is separable in the sense that equation (1) is decomposed into a function f that only reflects the surface/localization arbitrage and a second function h that reassembles the other price features, including energy performance, we have:

$$F = f(S, L) h(E, X, \gamma)$$

The two-step approach is chosen as if households show ordered preferences when searching a place to live. The first set of preference reflects the localization (proximity to work and leisure amenities) and budget constraint (expressed by the surface a household can afford given the localisation ideal). The second set of preferences is related to the global quality and services of the housing good and its capacity to satisfy the households comfort needs.

$$Price = F(S, L)e^u$$

The semi-parametric part of our approach lies in the hypothesis that the error term is assumed to follow a half normal distribution, ie. $u \sim N^+(0, \sigma_u^2)$ (Aigner et al., 1977). u is a one sided error term capturing the level of underlying inefficiency that can vary over observations and relates to other qualitative dwelling characteristics among them energy efficiency (proxy by a ranking) of the selected home. We can then model the distance to the frontier (inefficiency score) as follows:

$$u = h(E, X, \gamma) + v$$

Where v is a classical symmetric random noise, assumed to be normally distributed: $v \sim N(0, \sigma_v^2)$. Since we assume that both functions are separable, it is possible to observe linear and parametric features for $h(E, X, \gamma)$.

The model estimator and specification of efficiency measures obtained by frontier function is subject to a vivid and growing debate. DEA is a tool that measures efficiency but it does not explain efficiency differentials. To explain inefficiency, that is $1 - \theta \in [0, 1]$ on a given set of characteristics Z_i we must control for two main issues : first the separability hypothesis must hold (Simar et Wilson, 2011) and second, the inference at second-stage is applied to a non-standard Data Generating Process hereafter DGP (Simar & Wilson, 2007).

To ensure separability hypothesis we have to verify that there is no dependences between the variables used to perform the efficiency score and the discrete variables used in the residual analysis. We perform independence tests between the variables used in the first equation and the discrete variables used in the second equation. To perform the second-stage regression analysis, we choose the best fitted regression model between several options: linear regression models such as OLS, censored regression models such as Tobit, fractal regressions models such as Logit, Probit, or regression models that are based on truncated Normal distribution. Given the Data Generating Process of DEA efficiency scores, inefficiency is bounded to the interval $[0; 1]$.

There are various discussions on the relevance and consistency of each method and regression technique used to perform the second step residuals analysis. The debate going on is so contemporaneous that no preferable method has emerged as of today. Hoff (2007) and McDonald (2009) recommend the use of either linear or censored regression, (Papke and Wooldridge., 1996) and (Ramalho et al., 2010) recommend fractal regression models, finally (Simar & Wilson, 2007) propose to use truncated MLE regression with two consecutive bootstrap confidence intervals. (Kneip, Simar, Wilson, 2012) acknowledge also that those problems disappear asymptotically but at a lower rate than \sqrt{n} in classic inference. We know that OLS regression at the second stage is only consistent under specific conditions (Simar & Wilson; 2011). To test the robustness of our results to different specifications, we conduct estimation results using tobit, Normal Truncated and Logit regressions. Once we make sure that confidence intervals and estimators were robust to all regression models and given that we have a big dataset (1588 and 1185 observations), we only display tobit regression output in the results section. We are aware of the limits of tobit censored regression developed by (Simar and Wilson, 2007) that insist on the difference between censored model and truncated models (arguing that the DGP exhibit scores that are not censored by truncated by construction) and we use bootstrap procedures similar to those proposed by Simar and Wilson (2007) to calculate the confidence intervals for tobit estimators to valid inference in this framework. Bootstrapped confidence intervals and standard errors are shown in the result table

in appendix 8.2. Note that we used R statistical software to estimate the efficiency frontier functions and Stata13® for the second step regression model.

4. Data and results

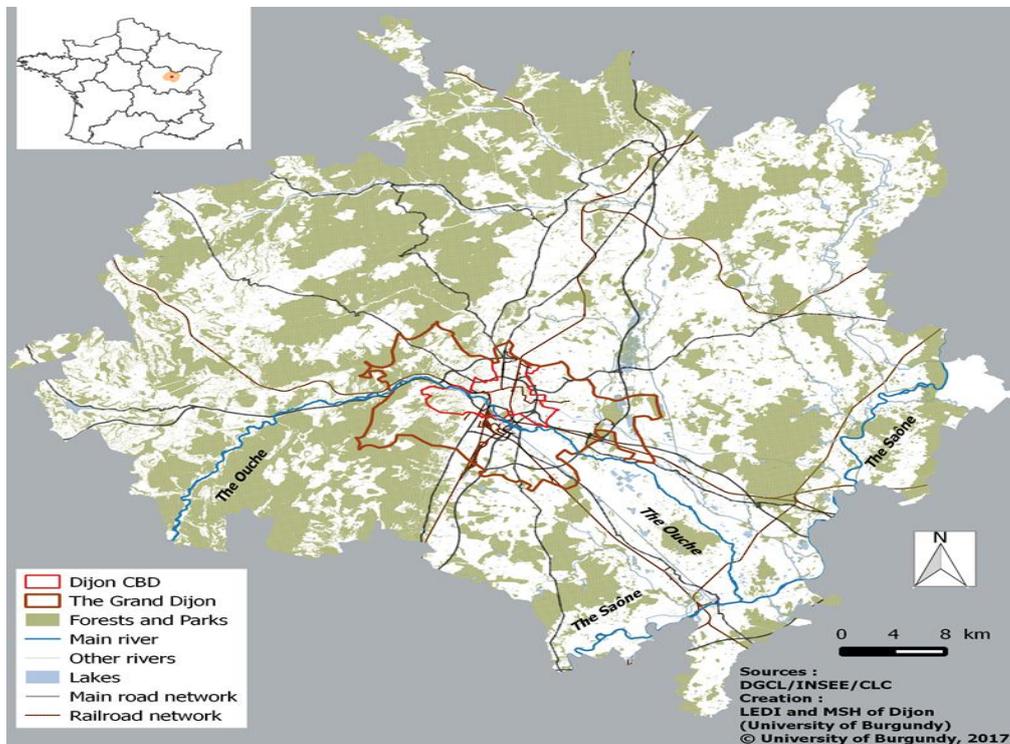
4.1. Descriptive statistics

Our data come from a notarial base that records residential housing sales in Dijon and its surroundings during the years 2013 and 2014. A reliable, homogeneous local dataset is very important to ensure the market homogeneity and the concentric feature of the land rent theorized by the Muth-Mills model (1972). Dijon urban area is the biggest (of surface and 295 communes) of the region Bourgogne – Franche-Comté (Figure 15) is homogeneous and centred around the historical centre that englobes social, transport and administrative amenities. The global area surface is 3 339 km². It contains 295 commune, 380 236 inhabitants and 168 000 jobs. Its main city Dijon has 153 003 inhabitants. The area is accessible to main urban metropol: Paris (by train), Lyon (by road), and vallée du Saône. Dijon housing market fundamentals are relatively stable during the year with a “normal” tension according to the French national statistics institute and despite the 2013 price deflation described in section 2. Housing stock is heterogeneous in size, age, price, global quality and localisation relative to its dwelling type (Table 9). Only 2% of sold houses are newly constructed compared to 18% of flats. Individual houses sold on the market are globally older and in worse shape than the collective dwelling market: 50% of houses need refurbishing or renovation against 21% of flats. 88% of individual houses are occupied by landlords and 7% of them have been purchased less than two years ago (INSEE, 2013) whereas 33% of collective flats are occupied by landlords and 70% have been purchased less than two years ago. This shows a clean distinction in the tenure structure, market dynamics and localisation (Figure 16) between the individual and the collective housing markets. As such they will be treated and modelled separately.

Of the whole dataset (4941 observations in total), 44% of houses and 34% of flats have information on the energy label and its corresponding energy annual consumption. There is a small bias regarding the available information and the price. Individual houses that display energy label information have a higher average price of 3%. On the contrary, collective dwellings that display energy performance certification information have a lower price of 3%. We have a final database of 1587 collective dwellings and 1185 individual houses, descriptive statistics are shown in Table 11 and Table 12. Energy Performance repartition matches the national average according to the

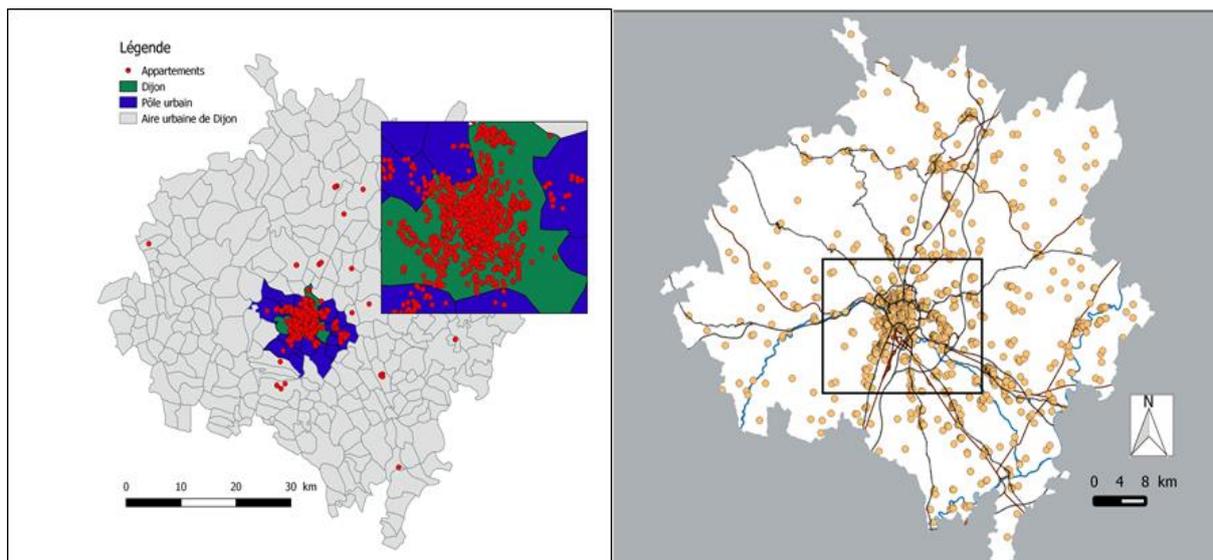
Phebus survey for the number of ABC dwellings (around 1.5% of the housing stock). However, our dataset counts far less inefficient dwellings (F and G labels) than the national average (Table 10).

FIGURE 15. DIJON URBAN AREA IN BOURGOGNE – FRANCHE-COMTÉ



SOURCES: LEDI AND MSH, UNIVERSITY OF BURGUNDY, 2017

FIGURE 16. DATA LOCALISATION POINTS ON DIJON URBAN AREA MAPS



SOURCES: LEDI AND MSH, UNIVERSITY OF BURGUNDY, 2017

TABLE 9. DIJON HOUSING MARKET CHARACTERISTICS

	Houses	Flats
Construction date	77%	74%
Before 1850 (code A)	2%	1%
1850 / 1913 (B)	6%	2%
1914 / 1947 (C)	22%	8%
1948 / 1969 (D)	19%	19%
1970 / 1980 (E)	18%	18%
1981 / 1991 (F)	9%	10%
1992 / 2000 (G)	7%	8%
2001 / 2010 (H)	13%	11%
2011 / 2020 (I)	4%	25%
Housing state (data coverage 42%)		
Old	98%	82%
New	2%	18%
Housing Type (2) (data coverage 99%)		
Standard 2 rooms apartment		77%
Suburbs pavilion built after 1949 with garden	50%	
City of Village House built before 1949	34%	
Studio Apartment		16%
Duplex or Triplex		7%
Rural House built before 1949	7%	
Villa built recently with high standard commodities	4%	
Other (Farms, mountain houses, Mills...)	4%	
Housing global state at the time of the sale		
Good	49%	79%
To Refurbish	31%	17%
To Renovate	20%	4%

SOURCE: AUTHOR.FROM BIEN DATASET

TABLE 10. ENERGY LABEL REPARTITION

Energy Label	A	B	C	D	E	F	G	Total
<i>Collective dwellings</i>	0,4%	1,1%	11,4%	33,8%	32,4%	15,9%	5,1%	1588
<i>Individual houses</i>	0,3%	0,7%	11,8%	31,5%	29,3%	16,5%	10,0%	1185
Total Dataset	0,4%	0,9%	11,6%	32,8%	31,1%	16,1%	7,2%	2773
National share (in 2012)	0,3%	2%	11,7%	24,1%	29,5%	15,4%	15,3%	100%

SOURCE: AUTHOR. FROM BIEN DATASET

NOTES: NATIONAL REPARTITION FROM PHEBUS SURVEY (2013)

TABLE 11. DESCRIPTIVE STATISTICS FOR COLLECTIVE DWELLINGS

<i>Descriptive Statistics for Collective Dwellings</i>	<i>Average</i>	<i>Median</i>	<i>SD</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Observation Number</i>
Collective dwellings (all)	118 734 €	109 174 €	61 399 €	- €	685 000 €	3543
Collective dwellings prices energy labelled A-G	116 665 €	105 000 €	61 289 €	3 000 €	685 000 €	1588
Collective Dwelling prices not energy labelled	120 450 €	111 830 €	61 448 €	- €	525 000 €	1954
<i>Final Database</i> ⁴⁶						
Price	116 737 €	105 000 €	61 242 €	14 000 €	685 000 €	1588
Price m ²	2 034 €	2 004 €	677 €	396 €	6 833 €	1588
Surface	59	61	22	8	157	1588
Distance CBD	2409	1641	3025	63	32621	1588
Minimum distance to disadvantaged districts	2197	2141	2176	62	27279	1588
Disadvantaged Districts (D.District Dummy)	0,06	0	0,24	0	1	1588
Parking (ref= no parking)	0,45	0	0,5	0	1	1588
Outdoor (ref=no outdoor)	0,42	0	0,49	0	1	1588
State (1=good)	0,28	0	0,45	0	1	1588
Construction period (Ref= before 1980)	0,28	0	0,45	0	1	1588
Energy Grade ABC dummy (Ref=DEFG grade)	0,13	0	0,33	0	1	1588

SOURCES: AUTHORS, DATA PERVAL 2015

⁴⁶ Two observations were dropped in the final database for collective dwellings and fourteen for individual houses. We dropped observations if the price ranges outside the 99th percentile (under 46 000€ or over 503 000€ for houses) and if there is a mismatch between the price and the habitable surface (price/m² outlier). Three observations for individual houses do not match the energy label and their state as seen on google earth.

TABLE 12. DESCRIPTIVE STATISTICS FOR INDIVIDUAL HOUSES

<i>Descriptive Statistics for Individual Houses</i>	<i>Average</i>	<i>Median</i>	<i>SD</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Observation Number</i>
Individual Houses (all)	197 301 €	180 000 €	113 133 €	3 000 €	2 500 000 €	2508
Individual Houses prices energy labelled A-G	198 551 €	185 000 €	78 790 €	46 000 €	503 400 €	1199
Individual Houses prices not energy labelled	193 161 €	176 475 €	127 909 €	3 000 €	2 500 000 €	1288
Final Database						
Price	198 551 €	185 000 €	78 790 €	46 000 €	503 400 €	1185
Price m ²	1 815 €	1 750 €	620 €	410 €	5 215 €	1185
Surface	111	106	28	55	225	1185
Distance CBD (meter)	14 045	12 298	10 246	784	42 254	1185
Minimum distance to disadvantaged districts (meter)	10 888	8 636	68 990	127	39 820	1185
Disadvantaged Districts (D.District Dummy)	0,04	0,00	0,19	0	1	1185
Parking (ref= no parking)	0,88	1,00	0,64	0	7	1185
Extrat Bathroom dummy (ref=1)	0,27	0,00	0,45	0	1	1185
State (ref=bad or unknown)	0,30	0	0,46	0	1	1185
Construction period (Ref= before 1980)	0,28	0	0,45	0	1	1185
Energy Grade ABC dummy (Ref=DEFG grade)	0,13	0	0,33	0	1	1185

SOURCES: AUTHORS, DATA PERVAL 2015

4.2. Localisation variables

The distance to the city centre (Place Darcy in Dijon) was calculated using Lambert2 coordinates and corresponding GPS standard coordinates using a software-based conversion formula. From longitude and latitudes data expressed in Lambert2 coordinates in the data base, we calculated the distance from the central point (place Darcy) in Cartesian meter using the following formula:

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

Following Beaumont (2004), we looked at the distance to the closest Disadvantaged District (or DDistricts). In 2013, DDistricts are identified as sensitive urban zone by the regional council (indicators found on INSEE⁴⁷). They also are neighbourhoods where social housing share is more than 50% of the total stock. We looked for DDistricts in Dijon centre and surroundings using their IRIS number. We then calculated the distance of each sold dwellings to the centre coordinates of the identified districts (Table 13). According to the coordinates, 157 collective dwellings and 112 houses are located in our area of analyse.

TABLE 13. DIJON DISADVANTAGED DISTRICTS

IRIS	District code	GPS Coordinates	City Postcode	City	IRIS Label	Ratio Social Housing /District	Ratio social housing /total
210060000	2105401	47.019517. 4.836603 X: 790023.67 Y: 2227428.30	21054	Beaune	Saint-Jacques	62.4%	65.6%
210120000		47.036587. 4.837740 X: 790049.70 Y: 2229327.59	21054	Beaune	Blanches Fleurs	57.1%	58.5%
210040000	2116601	47.300063. 5.008712 X : 802040.54 Y : 2259027.15	21166	Chenôve	Piscine-Valendons	80.0%	81.1%
210070000			21166	Chenôve	Chapitre-Bibliothèque	62.4%	66.5%
210110000			21166	Chenôve	Petignys-Chaufferie	57.7%	60.2%
210200000			21166	Chenôve	Saint-Exupery	48.0%	49.8%
210210000			21166	Chenôve	Mairie-Stade	47.2%	48.4%
210010000	2123112	47.319822.	21231	Dijon	Edouard	98.0%	97.9%

⁴⁷ <http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/duicq/region.asp?reg=26>

		5.002421 X: 801490.59 Y: 2261206.33			Belin		
210020000			21231	Dijon	Le Lac	97.7%	98.1%
		47.317385. 5.003381	21231	Dijon	Fontaines d'Ouche		
210030000		47.333892. 5.067099	21231	Dijon	Gresilles Centre	93.7%	91.4%
210130000	2123118	X : 806279.28 Y : 2262987.62 47.328882. 5.065111	21231	Dijon	Locheres	55.3%	64.6%
210050000	2135501	47.282333 5.058984 805908.29 2257187.71	21355	Longvic	Bief du Moulin	71.3%	72.3%
210080000	2151501	47.315176 5.110125 809645.90 2260971.73	21515	Quetigny	Les Huches	60.8%	63.0%
210140000	2161701	47.339293 4.995940 800927.72 2263353.08	21617	Talant	Belvédère/ Prevert- Plein Ciel	54.6%	61.0%

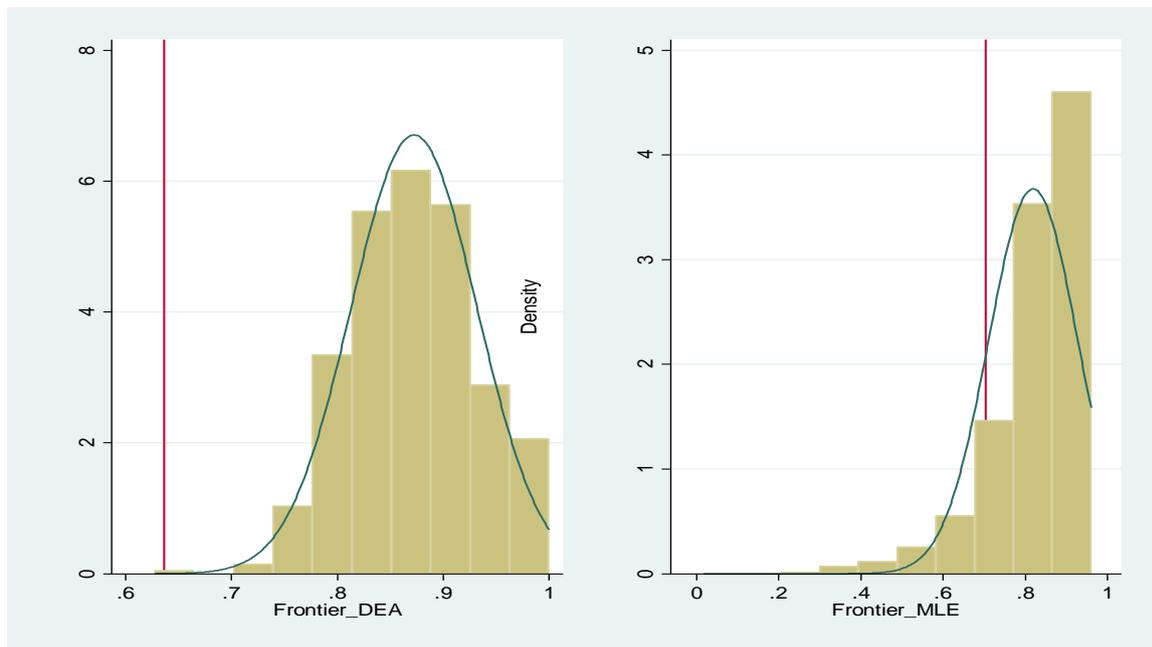
SOURCE: AUTHOR FROM INSEE DATA (RP 2015)

4.3. Results

4.3.1. Stage one: build the efficiency frontier with DEA and MLE analysis with continuous variables.

Frontiers' distribution functions for both DEA and MLE methods are presented in Figure 17. We only rely on the parametric setup to ensure the efficiency frontier verifies the basic economics of the market by looking at the relative signs and amplitude of its parameters. For interpretation and results we rely on DEA frontier as it offers many inference advantages. DEA approach is more robust to model choice and makes no assumption on the probability model and the functional form. DEA production set estimation is closer to the maximum efficiency line (where scores equal 1) than the MLE production set. The latter is also highly skewed due to the estimation method: semi-parametric MLE residuals include the error terms from the interval of the frontier's score and it is therefore more difficult to distinguish between the noise and inefficiency, whereas the DEA estimator doesn't. MLE compares observation to the average fringe whereas DEA compares them to the most efficient unit.

FIGURE 17. HISTOGRAM OF DEA AND MLE FRONTIERS WRT NORMAL DISTRIBUTION



SOURCES: AUTHORS (STATA13® OUTPUT)

TABLE 14. EFFICIENCY FRONTIER COEFFICIENTS AND SIGNIFICANCE TEST

Collective dwellings	X1 : Inverse Distance to city centre	X2 : Distance from the closest disadvantaged districts	X3 : Surface in m ²
Beta	0.057	0.099	0.864
SD	0.010	0.012	0.018
T-student	5.909	8.308	47.876

Individual houses	X1 : Inverse Distance to city centre	X2 : Distance from closest DDistricts	X3 : Surface in m ²	X4 : Land Surface in m ²
Beta	0.210	-0.027	0.777	0.130
SD	0.015	0.012	0.031	0.010
T-Student	13.884	-2.264	25.421	12.939

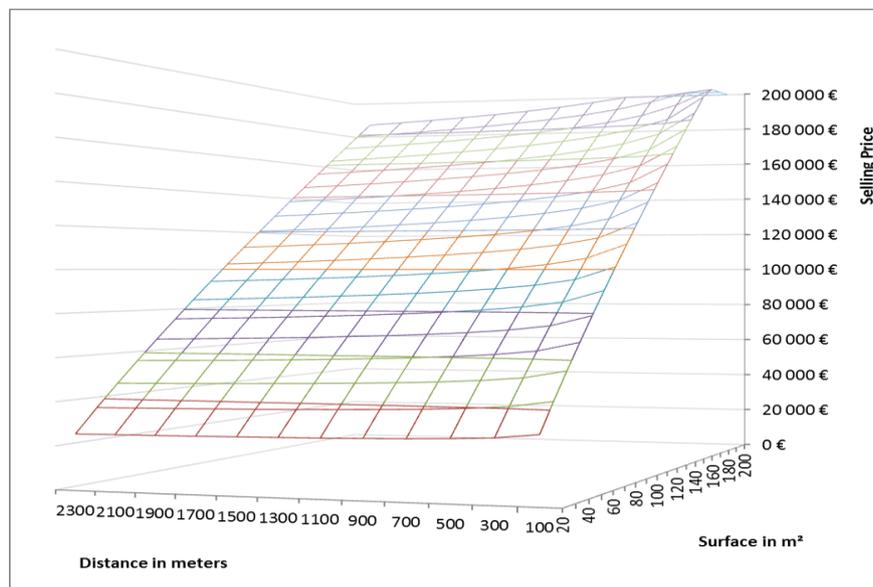
SOURCES: AUTHOR, RESULTS FROM MLE FRONTIER FUNCTIONS' ESTIMATIONS

Table 14 gives us the coefficients associated with the MLE frontier estimation for robustness check of the choice of input. We shall expect the selling price going up the closer we are to Dijon city centre and the further from the neighbour disadvantaged district. In terms of signs, the coefficient of the inverse distance vector should be positive; the closer we are from the city centre (and thus the higher the inverse distance), the higher the price is. Same reasoning holds for the DDistricts minimum distance vector: the further observation points are from the closest disadvantaged district, the higher the price.

The parametric estimation allows us to check that the collective dwelling market is positively impacted by the distance there exists between a specific housing good and its most neighbour disadvantaged district. However, we do not significantly observe this correlation for individual houses. The explanation can be that first, the disadvantaged districts are mostly composed of collective dwellings and their effect on price may only be seen on similar goods i.e. collective buildings and second, because those districts are mostly concentrated in the centre whereas the individual houses' market is much wider spread. Individual houses seem to suffer more than collective dwellings from being remote. The coefficient associated to the distance vector to the city centre is 4 times higher for individual houses than for collective dwellings. That is often the case in French urban configuration where all the activity is centralized downtown (jobs, shopping, culture, administration). The latter being mostly composed of collective buildings, it may explain why the distance effect is less important there (because they are all on average closer to city centre than individual houses).

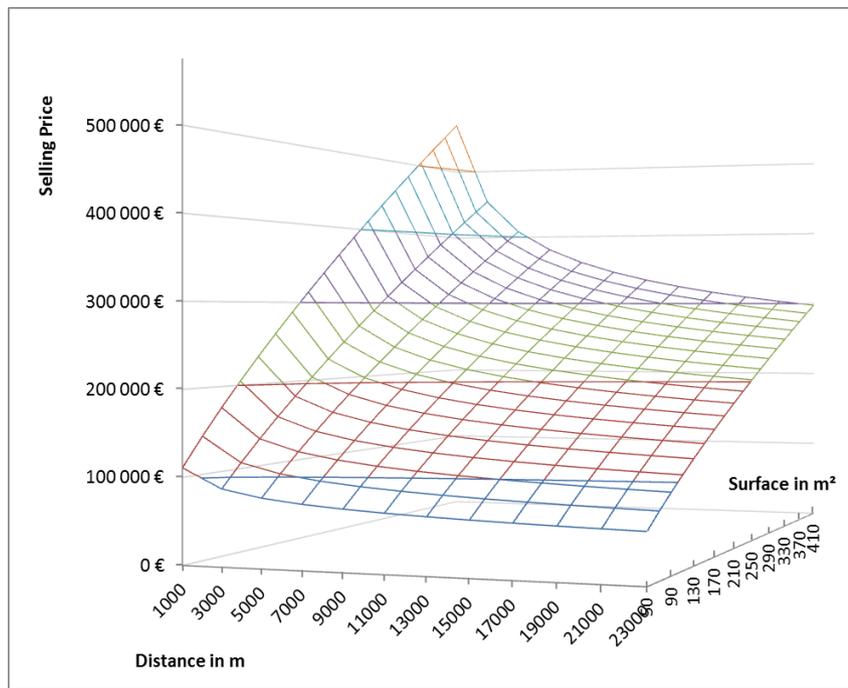
The following figures (Figure 18 and Figure 19) give a visual estimation of the efficiency frontier in the collective and individual market based on the MLE estimates for the impact on prices of the habitable surface and the distance in meters to Dijon's city centre.

FIGURE 18. COLLECTIVE DWELLINGS PRICES SET ESTIMATED USING MLE FRONTIER ESTIMATES



SOURCES: AUTHOR

FIGURE 19. INDIVIDUAL HOUSE PRICES SET ESTIMATED SET USING MLE FRONTIER ESTIMATES



SOURCES: AUTHOR

4.3.2. Stage 2: Frontiers’ residual analysis

In a second step, we want to determine if inefficiency (residuals from the efficiency frontier) can be explained by housing characteristics and if among them, energy efficiency has any impact on the value of residential housing price. Table 15 and Table 16 show the results for individual houses and collective dwellings. We would expect that the energy label has a negative impact on the frontier’s residuals, i.e. that ABC labelled dwellings are located closer to the efficiency frontier than DEFG homes. We use tobit censored model to estimate the impact of housing qualitative characteristics on efficiency score’s residuals in levels.

TABLE 15. RESULTS FOR INDIVIDUAL HOUSES

TOBIT regression for frontier's residuals in levels censored to [0;1]	DEA residuals	MLE residuals
Energy efficiency Grade ABC	-0.0107*** (0.00295)	-0.0303*** (0.00956)
Number of Rooms	0.0207*** (0.000666)	0.00384* (0.00197)

General State (ref=bad or unknown)	-0.00444** (0.00213)	ns
Pool	-0.0206*** (0.00458)	-0.0515*** (0.0142)
Construction period (ref= before1975)		-0.0594*** (0.00697)
Parking	ns	-0.0152** (0.00695)
Constant	-0.182*** (0.00949)	
Sigma	0.0329*** (0.000698)	0.103*** (0.00211)
Observations	1,185	1,185

Standard errors in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

SOURCES : AUTHORS

TABLE 16. RESULTS IN REDUCED FORM FOR COLLECTIVE DWELLINGS

TOBIT regression for frontier's residuals in levels censored to [0;1]	DEA residuals	MLE residuals
Energy efficiency Grade ABC	-0.0122*** (0.00326)	-0.0139* (0.00759)
Number of Rooms	0.0241*** (0.000976)	0.0146*** (0.00227)
Extra Bathroom	-0.0444*** (0.00600)	-0.0607*** (0.0140)
General State (ref=bad or unknown)		-0.0103* (0.00551)
Construction period (ref= before1975)	-0.00612** (0.00288)	-0.0366*** (0.00675)
Parking	-0.0132*** (0.00247)	-0.0402*** (0.00577)

Outdoor	-0.0150*** (0.00246)	-0.0418*** (0.00574)
Constant	0.0373*** (0.00963)	0.107*** (0.0225)
Sigma	0.0420*** (0.000752)	0.0978*** (0.00174)
Observations	1,588	1,588
Standard errors in parentheses *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1		

SOURCES : AUTHOR FROM SECOND STEP RESIDUALS REGRESSION ANALYSIS

As we see on Table 15 and Table 16, ABC rated homes reduce price inefficiency in individual houses by [1.07%; 3.03%], and [1.22%; 1.39%] in collective housing. The magnitude of the green property value depends on the frontier estimation method. DEA estimator gives more conservative measures. In individual houses, buyers seem to (sadly) value more the presence of a pool than energy performance (price improves by 2% and 5%), but value less the number of rooms which can translate the preference of the actual market for big living areas rather than a lot of small and less luminous rooms for the same habitable surface.

It is interesting to note that some explanatory variables are significative when the frontier is calibrated using MLE, while it is not the case when we model the efficiency frontier with DEA. For instance, the impacts of general state of the housing good, parking and bathrooms; as well as the construction period, are sensitive to the method used. In fact, it appears that the variance associated with MLE residuals is much higher than the one estimated with DEA frontier estimation because of the inclusion of extreme values within the DEA production set whereas they are left in the residuals of the MLE frontier estimation. We tested for the robustness of the DEA coefficient for both dwelling types using bootstrap intervals for coefficient and standard errors (see appendix 8.2).

Using the same models, we derived the green property value as a discount applied to inefficient homes. Output results are displayed in appendix 8.3 but Table 17 gives a synthesis of the results. We see that the less energy performant a housing good is, the higher the discount on price compared to a performant property good. D and E labels are more sanctioned in collective dwellings than in individual houses. The discount associated to the G label remain the same by dwelling type when using DEA but reach 12% in individual houses (comparatively to 2.7% in flats) when using MLE.

TABLE 17. GREEN PROPERTY DISCOUNT FOR INEFFICIENT HOMES

	Individual Houses		Collective dwellings	
	DEA	MLE	DEA	MLE
ABC	ref.	ref.	ref.	ref.
D	-1,02%	-1,90%	-1,20%	Non significant
E	-1,08%	-3,80%		
F	-1,10%	-6,20%	-1,30%	-2,70%
G	-1,30%	-12%		

SOURCE: AUTHOR FROM TOBIT REGRESSION'S RESULTS ON THE FULL DPE LABEL VARIABLE

5. Empirical application and discussion

Is Green Property Value an effective tool to reduce the energy efficiency gap? We just demonstrated that high energy performance certification (A, B or C label) can have a market value on the private housing market. Although it is a robust result, this value is rather small compared to the upfront investment needed to obtain the corresponding certification in the retrofit market, especially in the existing housing stock. In this section we provide a simple cost/benefits analysis to measure to what extent the green property premium at the time of sale can offset part of the upfront cost needed to achieve significant energy retrofits.

Green building labels are already costly to obtain. (Dwaikat and Ali, 2016) show that, according to the academic and professional literature, green buildings can cost up to 21% higher than regular construction⁴⁸. Such analysis doesn't exist for the upfront cost estimation in energy retrofit for the existing stock. We used applied empirical studies and real life experiments retrieved by academics, dedicated institutions (ADEME), professional syndicates (*Union Sociale de l'Habitat* or USH) and utilities⁴⁹ (EDF) to propose a first estimation of the investment needed to achieve significant energy retrofit for existing housing goods.

As shown in Table 18, for two types of retrofit investments in dwellings in Dijon area, investment return from green property value for an average flat (house) priced 2030€ (1815€) per m² and sized on average 60m² should be around 18€ and 24.5€ (54€-28€) per m² relatively to the frontier

48 Among the 17 reviewed empirical studies of the paper, only six publications were classified as academic publications,

49 The French electricity provider EDF performed an experimental trial on selected houses to abide by its obligation to obtain Energy Performance Certificates in 2014.

method used (higher green property values are recorded for MLE frontier estimation). Upfront costs per m² are obtained from the average of the existing studies and experiences in energy retrofit per dwelling type corresponding to the attribution of a grade B in the EPC (more detailed explanation on cost estimations are shown in appendix 0). Green property value offers a return on gross initial investment between 5% and 14% in individual houses and 6%-7% in collective dwellings.

TABLE 18. COST BENEFIT ANALYSIS

	Average Price per m ²	Average surface	Average energy retrofit investment / m ²	Green property Value per m ²	Investment return
Houses	1815 €	110	391 €	18€-54€	5% -14%
Flats	2030 €	60	398 €	24.5€-28 €	6%-7%

SOURCES: UPFRONT COST PER M² ARE OBTAINED BY COMPILING EXISTING REAL CASES STUDIES (SEE APPENDIX 0)

This result doesn't take into account the impact on the investment decision of other determinants, either monetary (liquidity constraints and interest rates levels) and non-monetary such as comfort which is the most invoked reason to engage in energy retrofit among households (OPEN, 2015). People invest to improve the quality of their home mostly to improve their comfort, then to reduce their utility bill and finally to improve the patrimonial value of their home.

Can those results be extended to the national level? Green Property Value is deeply rooted with market fundamentals: household's income, property tax levels, interest rates, vacancy rate and expected price changes. Those fundamentals are heterogeneous and vary across regions and cities. They influence energy performance in two ways: from the supply point of view and from the demand point of view. A market where supply excess demand sets poor expectations about price change dynamics and offers low incentives to invest in housing quality. Especially low income levels, risky environment and high vacancy rate can lower investment per square meter (Claudy and Michelsen, 2016). On the other hand, when demand excess supplies on a local market, housing goods are valued most for their localization features. A fair green property value is more likely to emerge in local housing market with sound fundamentals (with no shortage or excess in production). To our viewpoint, green property value investigation should be continued at the disaggregated local or regional level rather than investigated at the aggregated national level.

6. Conclusion

This chapter uses the efficiency frontier two-stage analysis to model price efficiencies in the local housing market of Dijon (Burgundy, France). Controlling for both distance and contiguity spatial factors, we provide empirical proof of the existence of a green property value. We find that, given other qualitative characteristics (parking, construction period, pool...) individual houses bear a green premium between 1% and 3% and 1.2% for collective dwellings. Magnitude of green property value varies across the frontier's estimation method. The DEA estimator gives more conservative estimates than the Maximum Likelihood Estimator.

We acknowledge that our green value estimates fall on the most conservative range of the green property value literature (1% to 3% with respect to 3.5%- 4.5%). It might be the fact that the introduction of spatial factors, especially distance vector can underestimate the green property value. Meta-analysis showed that distance vectors tend to reduce significantly the estimated green property value (Fizaine et al., 2017). Whereas the introduction of precise geolocalization features tends to lead to higher green property value estimates (Maslianskaia-Pautrel, 2016). The calibration of a spatial model within the efficiency frontier analysis framework should be in that sense, further investigated⁵⁰.

After a simple cost-benefit analysis, we show that green property value can offset 5% to 14% in individual houses and 6%-7% in collective dwellings, of the gross retrofit upfront cost. Combined with a better monetary valuation for comfort utility, the diffusion of public information about the existing green property value, associated with repeated test measures to check market fundamentals on a local level, can trigger private investment in energy efficiency and address part of the profitability issue raised in the energy efficiency gap literature.

⁵⁰ We can cite the work of (Fusco and Vidoli 2015) that develops a statistical tool to estimate spatial stochastic frontier functions to model firm performance in Italy with regional heterogeneity effects.

7. References

- Achtnicht, Martin, and Reinhard Madlener. 2014. 'Factors Influencing German House Owners' Preferences on Energy Retrofits'. *Energy Policy* 68: 254–63. doi:10.1016/j.enpol.2014.01.006.
- ADEME. 2011. 'Analyse préliminaire de la valeur verte pour les logements'. Benchmark. *ADEME*. <http://www.ademe.fr/analyse-preliminaire-valeur-verte-logements>.
- Ahern, Ciara, Philip Griffiths, and Micheál O'Flaherty. 2013. 'State of the Irish Housing stock—Modelling the Heat Losses of Ireland's Existing Detached Rural Housing Stock & Estimating the Benefit of Thermal Retrofit Measures on This Stock'. *Energy Policy* 55 (April): 139–51. doi:10.1016/j.enpol.2012.11.039.
- Aigner, Dennis, CA Knox Lovell, and Peter Schmidt. 1977. 'Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models'. *Journal of Econometrics* 6 (1): 21–37.
- Alberini, Anna, Will Gans, and Charles Towe. 2013. 'Free Riding, Upsizing, and Energy Efficiency Incentives in Maryland Homes'. http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2336044.
- Allibe, Benoit. 2012. 'Modélisation Des Consommations D'énergie Du Secteur Résidentiel Français : Amélioration Du Réalisme Comportemental et Scénarios Volontaristes'. Paris, EHESS. <http://www.theses.fr/2012EHES0006>.
- Anglin, Paul M., and Ramazan Gençay. 1996. 'Semiparametric Estimation of a Hedonic Price Function'. *Journal of Applied Econometrics* 11 (6): 633–48.
- Anselin, Luc, Anil K. Bera, Raymond Florax, and Mann J. Yoon. 1996. 'Simple Diagnostic Tests for Spatial Dependence'. *Regional Science and Urban Economics* 26 (1): 77–104. doi:10.1016/0166-0462(95)02111-6.
- Ayala, Amaia de, Ibon Galarraga, and Joseph V. Spadaro. 2016. 'The Price of Energy Efficiency in the Spanish Housing Market'. *Energy Policy* 94 (July): 16–24. doi:10.1016/j.enpol.2016.03.032.
- Bala, Alain Pholo, Dominique Peeters, and Isabelle Thomas. 2014. 'Spatial Issues on a Hedonic Estimation of Rents in Brussels'. *Journal of Housing Economics* 25 (September): 104–23. doi:10.1016/j.jhe.2014.05.002.
- Baumont, Catherine. 2004. 'Spatial Effects in Housing Price Models. Do Housing Prices Capitalize Urban Development Policies in the Agglomeration of Dijon (1999)?' LEG - Document de travail - Economie 2004-04. LEG, Laboratoire d'Economie et de Gestion, CNRS, Université de Bourgogne. <https://ideas.repec.org/p/lat/legeco/2004-04.html>.

- Bin, Okmyung. 2004. 'A Prediction Comparison of Housing Sales Prices by Parametric versus Semi-Parametric Regressions'. *Journal of Housing Economics* 13 (1): 68–84.
doi:10.1016/j.jhe.2004.01.001.
- Brisepierre, Gaëtan. 2014. 'Comment Se Décide Une Rénovation Thermique En Copropriété? Un Nouveau Mode D'organisation de L'habitat Comme Condition de L'innovation Énergétique'. *Flux*, no. 2: 31–39.
- . 2017. 'Article : Les Dynamiques Sociales de Rénovation Énergétique Dans L'habitat Privé (2016) | Gaëtan Brisepierre Sociologue'. Accessed April 25.
<http://gbrisepierre.fr/les-dynamiques-sociales-de-renovation-energetique-dans-lhabitat-prive-2016/>.
- Brounen, Dirk, and Nils Kok. 2011. 'On the Economics of Energy Labels in the Housing Market'. *Journal of Environmental Economics and Management* 62 (2): 166–79.
doi:10.1016/j.jeem.2010.11.006.
- Bruegge, Chris, Carmen Carrión-Flores, and Jaren C. Pope. 2016. 'Does the Housing Market Value Energy Efficient Homes? Evidence from the Energy Star Program'. *Regional Science and Urban Economics* 57 (March): 63–76.
doi:10.1016/j.regsciurbeco.2015.12.001.
- Cajias, Marcelo, and Daniel Piazzolo. 2012. 'Green Performs Better: Energy Efficiency and Financial Return on Buildings'. SSRN Scholarly Paper ID 2186036. Rochester, NY: Social Science Research Network. <http://papers.ssrn.com/abstract=2186036>.
- Cayla, Jean-Michel, Nadia Maizi, and Christophe Marchand. 2011. 'The Role of Income in Energy Consumption Behaviour: Evidence from French Households Data'. *Energy Policy* 39 (12): 7874–83. doi:10.1016/j.enpol.2011.09.036.
- Choi, Seok Joon, and Sangsin Kim. 2012. 'Why Do Landlords Include Utilities in Rent? Evidence from the 2000 Housing Discrimination Study (HDS) and the 2002 American Housing Survey (AHS)'. *Journal of Housing Economics* 21 (1): 28–40.
doi:10.1016/j.jhe.2012.02.001.
- Claudy, Marius, and Claus Michelsen. 2016. 'Housing Market Fundamentals, Housing Quality and Energy Consumption: Evidence from Germany'. *The Energy Journal* 37 (4).
doi:10.5547/01956574.37.4.mcla.
- Dwaikat, Luay N., and Kherun N. Ali. 2016. 'Green Buildings Cost Premium: A Review of Empirical Evidence'. *Energy and Buildings* 110 (January): 396–403.
doi:10.1016/j.enbuild.2015.11.021.
- Eichholtz, Piet, and Thies Lindenthal. 2014. 'Demographics, Human Capital, and the Demand for Housing'. *Journal of Housing Economics* 26 (December): 19–32.
doi:10.1016/j.jhe.2014.06.002.

- European Commission; DG Energy. 2011. 'Energy Performance Certificates in Buildings and Their Impact on Transaction Prices and Rents in Selected EU Countries'. *BuildingRating*. <http://www.buildingrating.org/document/energy-performance-certificates-buildings-and-their-impact-transaction-prices-and-rents>.
- F. Dormann, Carsten, Jana M. McPherson, Miguel B. Araújo, Roger Bivand, Janine Bolliger, Gudrun Carl, Richard G. Davies, et al. 2007. 'Methods to Account for Spatial Autocorrelation in the Analysis of Species Distributional Data: A Review'. *Ecography* 30 (5): 609–28. doi:10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x.
- Filippidou, Faidra, Nico Nieboer, and Henk Visscher. 2016. 'Energy Efficiency Measures Implemented in the Dutch Non-Profit Housing Sector'. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2016.05.095.
- Fillippini. 2011. 'Energy Demand and Energy Efficiency in the OECD Countries: A Stochastic Demand Frontier Approach'. *The Energy Journal* 32 (2).
- Fizaine, F., Voyer, P., and Baumont, C. (2017). The green exuberance: do studies really support high green premium in building? Working paper, LEDI, University of Burgundy.
- Fuerst, Franz, Patrick McAllister, Anupam Nanda, and Peter Wyatt. 2015. 'Does Energy Efficiency Matter to Home-Buyers? An Investigation of EPC Ratings and Transaction Prices in England'. *Energy Economics* 48 (March): 145–56. doi:10.1016/j.eneco.2014.12.012.
- Fusco, Elisa, and Francesco Vidoli. 2015. 'Spatial Stochastic Frontier Models: Instructions for Use'. *Vignette R Package Version 1*. <https://mirror.mdx.ac.uk/R/web/packages/ssfa/vignettes/ssfavignette.pdf>.
- Gerarden, Todd D., Richard G. Newell, and Robert N. Stavins. 2015. 'Assessing the Energy-Efficiency Gap'. National Bureau of Economic Research. <http://www.nber.org/papers/w20904>.
- Gillingham, K., and K. Palmer. 2014. 'Bridging the Energy Efficiency Gap: Policy Insights from Economic Theory and Empirical Evidence'. *Review of Environmental Economics and Policy* 8 (1): 18–38. doi:10.1093/reep/ret021.
- Gillingham, Kenneth, and Karen Palmer. 2013. 'Bridging the Energy Efficiency Gap'. *Resources for the Future Discussion Paper*, 13–02.
- Giraudet, Louis-Gaëtan, and Sébastien Houde. 2015. 'Double Moral Hazard and the Energy Efficiency Gap'. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01260907/>.
- Goodman, Allen C. 1978. 'Hedonic Prices, Price Indices and Housing Markets'. *Journal of Urban Economics* 5 (4): 471–84. doi:10.1016/0094-1190(78)90004-9.

- Horowitz, Marvin J., and Paolo Bertoldi. 2015. 'A Harmonized Calculation Model for Transforming EU Bottom-up Energy Efficiency Indicators into Empirical Estimates of Policy Impacts'. *Energy Economics* 51 (September): 135–48. doi:10.1016/j.eneco.2015.05.020.
- Hyland, Marie, Ronan C. Lyons, and Seán Lyons. 2013. 'The Value of Domestic Building Energy Efficiency — Evidence from Ireland'. *Energy Economics* 40 (November): 943–52. doi:10.1016/j.eneco.2013.07.020.
- Jaffe, Adam B., Richard G. Newell, and Robert N. Stavins. 1999. 'Energy-Efficient Technologies and Climate Change Policies: Issues and Evidence'. http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=198829.
- Kahn, Matthew E., and Nils Kok. 2014. 'The Capitalization of Green Labels in the California Housing Market'. *Regional Science and Urban Economics*, SI: Tribute to John Quigley, 47 (July): 25–34. doi:10.1016/j.regsciurbeco.2013.07.001.
- Khalili-Damghani, Kaveh, Madjid Tavana, Francisco J. Santos-Arteaga, and Sima Mohtasham. 2015. 'A Dynamic Multi-Stage Data Envelopment Analysis Model with Application to Energy Consumption in the Cotton Industry'. *Energy Economics* 51 (September): 320–28. doi:10.1016/j.eneco.2015.06.020.
- Krishnamurthy, Chandra Kiran B., Bengt Kriström, and others. 2015. 'How Large Is the Owner-Renter Divide in Energy Efficient Technology? Evidence from an OECD Cross-Section'. *The Energy Journal* 36 (4): 85–104.
- Maslianskaia-Pautrel, Masha, and Catherine Baumont pba148. 2016. 'The Nature and Impacts of Environmental Spillovers on Housing Prices: A Spatial Hedonic Analysis'. Working Paper 2016.04. FAERE - French Association of Environmental and Resource Economists. <https://ideas.repec.org/p/fae/wpaper/2016.04.html>.
- Mauroux, Amélie. 2015. 'Exposition aux risques naturels et marchés immobiliers'. *Revue d'économie financière*, no. 117 (April): 91–103.
- Meese, Richard, and Nancy Wallace. 1991. 'Nonparametric Estimation of Dynamic Hedonic Price Models and the Construction of Residential Housing Prices Indices'. *eScholarship*, May. <http://escholarship.org/uc/item/45d7c9bn>.
- Michelsen, Claus, and Konstantin Kholodilin. 2015. 'The Market Value of Energy Efficiency in Buildings and the Mode of Tenure'. <https://www.econstor.eu/handle/10419/112881>.
- Neroutsou, T. I., and Ben Croxford. 2016. 'Lifecycle Costing of Low Energy Housing Refurbishment: A Case Study of a 7 Year Retrofit in Chester Road, London'. *Energy and Buildings* 128 (September): 178–89. doi:10.1016/j.enbuild.2016.06.040.

- Orea, Luis, Manuel Llorca, and Massimo Filippini. 2014. 'Measuring Energy Efficiency and Rebound Effects Using a Stochastic Demand Frontier Approach: The US Residential Energy Demand'. Efficiency Series Paper 2014/01. University of Oviedo, Department of Economics, Oviedo Efficiency Group (OEG). <https://ideas.repec.org/p/oeg/wpaper/2014-01.html>.
- Parkinson, Aidan, Stephen Hill, and Richard Wheal. 2016. 'An Income-Based Analysis of the Value Premise for Property Energy Performance'. *Energy* 106 (July): 162–69. doi:10.1016/j.energy.2016.03.019.
- Ramalho, Esmeralda A., Joaquim JS Ramalho, and Pedro D. Henriques. 2010. 'Fractional Regression Models for Second Stage DEA Efficiency Analyses'. *Journal of Productivity Analysis* 34 (3): 239–255.
- Rosen, Sherwin. 1974. 'Hedonic Prices and Implicit Markets: Product Differentiation in Pure Competition'. *Journal of Political Economy* 82 (1): 34–55.
- Shim, Jooyong, Okmyung Bin, and Changha Hwang. 2014. 'Semiparametric Spatial Effects Kernel Minimum Squared Error Model for Predicting Housing Sales Prices'. *Neurocomputing* 124 (January): 81–88. doi:10.1016/j.neucom.2013.07.035.
- Simar, Léopold. 2012. 'Efficiency Analysis : The Statistical Approach - Lecture Notes'. IFP School.
- Simar, Léopold, and Paul W. Wilson. 2007. 'Estimation and Inference in Two-Stage, Semi-Parametric Models of Production Processes'. *Journal of Econometrics* 136 (1): 31–64. doi:10.1016/j.jeconom.2005.07.009.
- . 2011. 'Two-Stage DEA: Caveat Emptor'. *Journal of Productivity Analysis* 36 (2): 205–218.
- Tversky, Amos, and Daniel Kahneman. 1974. 'Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases'. *Science* 185 (4157): 1124–31.
- Walls, Margaret, Karen L. Palmer, and Todd Gerarden. 2013. 'Is Energy Efficiency Capitalized into Home Prices? Evidence from Three US Cities'. *Evidence from Three US Cities (July 19, 2013)*. *Resources for the Future DP*, 13–18.
- Zahirovich-Herbert, Velma, and Karen M. Gibler. 2014. 'The Effect of New Residential Construction on Housing Prices'. *Journal of Housing Economics* 26 (December): 1–18. doi:10.1016/j.jhe.2014.06.003.

8. Appendices

8.1. Literature Review for green housing value

Study Reference	Data Coverage	Method	Results
USA			
Griffin et al., 2009	EnergyStar labels in Portland	Hedonic model using dummy for Energy star or LEED criteria	Market value : +3%/+9,6% Vacancy rate (sell duration) ; -18 days
Kahn and Kok (2014)	Green labels in the California housing market	hedonic pricing analysis of all single-family home sales in California over the time period 2007 to 2012	Incremental value for certified homes of 2.1% for the most conservative estimate (5% and +\$8400 on average). The premium offset in theory the input cost for those buildings (\$4000-\$10 000) There evidence of spatial variation in this capitalization such that both environmental ideology and local climatic conditions play a role in explaining the variation in the green premium across geographies.
Bruegge et al. (2016)	EnergyStar program in Florida between 1997 and 2009	Hedonic price model on panel data using pooled OLS	There is a price premium for EnergyStar homes but that premium fades rapidly and disappears over time as building codes improve the non-labelled new buildings.
Ben. J Kaufman, (2010)	study for the Washington state residential Market	Times series analysis	Seattle market value +9.1% on average and factor 4 in vacancy rate. There are periods when non certified houses priced higher than certified ones: signs of market stress.
Europe			
Brounen & Kok (2009)	18 000 certified houses in the Netherlands	Hedonic sales price model	Market value : +2,8% and sells quicker Energy label has more impact than multilevel certification Authors find that energy performance sells better when housing market is not under stress. They also underline the lack of “energy literacy”
Brounen and Kok (2011)	32000 certified houses in the Netherlands	Hedonic sales price model	Premiums for ABC labels (10%,5.5% and 2%) and discounts for E, F and G labels (0.5%, 2.5%, 5%) with respect to D labels.
Alberini et al (2014)	Car sales in Switzerland between 2000 and 2011	Hedonic price model on panel data using regression discontinuity design	The effect of A label on a car price is approximately 5%. A fuel economy premium is consistent with low discount

			rate (2.5%)
A. de Ayala et al. (2016)	Energy efficiency rating in the national Spanish housing market (1507 obs)	Hedonic price model with ABC label and city dummy	ABC homes are priced 9.8% higher than D, E, F or G homes. ABCD labels have a 5.4% premium compared to EFG. But only 10% of Spanish homes have A,B or C energy efficiency rating.
European Commission, DG Energy (2013)	Austria, Belgium, France, Ireland and UK	Hedonic price controlling for regional and density factor using dummy variables	Positive premium in both market and rental values for several European cities except one (Oxford). The price gap ranges from 2% to 11% in market value and from 1% to 5% difference in renting value
Cajias and Piazzolo (2013)	2630 building observations from 2008 to 2010 on the German residential sector	Hedonic price controlling for regional and building specific factors	Elasticity of energy conservation on market value of 0.45 and 0,08 for rental value
Hyland et al. (2013)	15 060 buildings on the Irish residential market	Logit estimation using Heckman procedure (less than 5% of obs. Had EE rating)	Price premiums for A, B, and C housing of 9.3%, 5.5% and 1.7%) and price discount for E, F and G of 0.4%, 10% and 6%)
Kholodilin et Michelsen (2014)	Berlin housing market (both residential and rental sector)	Hedonic regressions with comparison of implicit prices and the net present value of energy cost savings/rents	Energy efficiency is capitalized in house prices but there is a landlord-tenant dilemma". The implicit price of energy efficiency in a tenant-occupied dwelling is below the level of owner-occupied by a factor of 2.5
Fuerst et al. (2015)	333 095 dwellings sold at least twice between 1995 and 2012 on the English residential market	Hedonic price model	Price premiums for A/B or C (5%, 1.8%) and discounts for E and F (0.7% and 0.9%) but there is considerable variation across regions and property types
City of Darmstadt, Germany (2010)	City of Darmstadt, Germany	Continuous Energy consumption criteria	Market value increases +0,38€/m ² for housing that consumes less than 175kWh/m ² /year and + 0,50 € / m ² for housing that consumes over 175 kWh/m ² /year
Savi et al. (2011)	Market value for Swiss housing market with MINERGIE green certification between 2008 and 2010	Times series and qualitative survey	MINERGIE house costs +6.3% (15% in 2002) on average and reduces energy charges by 0.6% each year. N 2010 Houses market value +7% Collective dwellings : market value + 3.5 %, Rent value : + 6 %
Claudy and	Estimate the influence	Structural Equation	Regional housing market fundamentals

Michelsen (2016)	of housing market features on the regional energy consumption through housing quality	Modelling	(vacancy, income levels, and expectations) influence the energy performance of the housing stock and the resulting energy consumption. Weak fundamentals lead to weak incentives to invest in housing quality.
France			
DINAMIC (2013, 2015)	Sales of 200 000 houses in 2010 at « good state » according to 8 climate and 5 price zones	Spatial Estimation Model (hedonic models using localization variables)	The study concludes that each energy label contains a 5% average price gap.
ADEME (2011)	Low Consumption (<50kwh/m ² /year) Building labels for new and old dwellings	Qualitative and field experience approach on 20 deep retrofit homes followed over time.	Market value for renovated buildings increased from 5% to 22% (very dependent on energy heating source) In the construction market, green value is estimated at 5,5% in collective dwellings (13500€/flat) and 6% in individual houses (variates according to energy source)

SOURCES: AUTHOR'S REVIEW

8.2. Robustness Checks

TABLE 19. BOOTSTRAP ESTIMATION OF TOBIT REGRESSION ON INDIVIDUAL HOUSES DATA
SAMPLE

	Individual Houses		
TOBIT regression for frontier's residuals in levels censored to [0;1] with bootstrap standard errors	DEA residuals	Bootstrapped interval (Normal Based 95%)	
Energy efficiency Grade ABC	-0.0107*** (0.0031566)	-0.0168	-0.004518
Number of Rooms	0.0207*** (0.0013118)	0.01814	0.02328
General State (ref=bad or unknown)	-0.00444** (0.002164)	-0.00868	-0.0002
Pool	-0.0206*** (0.006225)	-0.2034	-0.15982
Constant	-0.182*** (0.0111377)	-0.20348	-0.1598
Sigma	0.0329*** (0.000698)	0.030754	0.0349643
Observations	1,185	1,185	1,185

Standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

SOURCE. AUTHOR

TABLE 20. BOOTSTRAP ESTIMATION OF TOBIT REGRESSION MODEL ON COLLECTIVE DWELLINGS DATA SAMPLE

TOBIT regression for frontier's residuals in levels censored to [0;1] with bootstrapped standard errors	Collective Dwellings		
	DEA residuals	Bootstrapped interval (Normal Based 95%)	
Energy efficiency Grade ABC	-0.0122*** (0.00345)	-0,018995	-0,005466
Number of Rooms	0.0241*** (0.001117)	0.02195	0.0263278
Extra Bathroom	-0.0444*** (0.00726)	-0.0586416	-0.0301792
Construction period (ref= before1975)	-0.00612** (0.00255)	-0.111242	-0.0011158
Parking	-0.0132*** (0.00237)	-0.01784	-0.00855
Outdoor	-0.0150*** (0.00253)	-0.019982	-0.010048
Constant	0.0373*** (0.011132)	0.01551	0.05915
Sigma	0.0420*** (0.000752)		
Observations	1,588		

Standard errors in parentheses
 *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

SOURCE. AUTHOR

8.3. Green property discount

TABLE 21. STAGE 2 REGRESSION ON FRONTIER RESIDUALS FOR COLLECTIVE DWELLINGS

Collective Dwellings	DEA	MLE
EPC ABC	ref.	ref.
DE (grouped)	0.0121*** (0.00329)	0.0112 (0.00765)
FG (grouped)	0.0128*** (0.00400)	0.0273*** (0.00930)
nbr_pieces_quant	0.0242*** (0.000992)	0.0157*** (0.00231)
SDB_dum	-0.0445*** (0.00600)	-0.0616*** (0.0140)
Constr_dum	-0.00614** (0.00289)	-0.0370*** (0.00674)
Parking_dum	-0.0131*** (0.00248)	-0.0103* (0.00550)
terrasse_balcon_jardin	-0.0149*** (0.00249)	-0.0390*** (0.00578)
Constant	0.0246** (0.0104)	-0.0398*** (0.00579)
		0.0831*** (0.0242)
Sigma	0.0420*** (0.000752)	0.0976*** (0.00173)
Observations	1,588	1,588

Standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

SOURCE: AUTHOR.FROM BIEN DATASET

TABLE 22. STAGE 2 REGRESSION ON FRONTIER RESIDUALS FOR INDIVIDUAL HOUSES

Individual Houses	DEA	MLE
ABC	Ref.	Ref.
D	0.0102*** (0.00320)	0.0193** (0.00952)
E	0.0108*** (0.00328)	0.0386*** (0.00989)
F	0.0111*** (0.00372)	0.0624*** (0.0112)
G	0.0132*** (0.00431)	0.119*** (0.0128)
Nb of Rooms	0.0209*** (0.000689)	0.00675*** (0.00193)
General state	-0.00411* (0.00218)	
Pool	-0.0204*** (0.00459)	-0.0412*** (0.0137)
Construction Period		-0.0412*** (0.00699)
Parking		-0.0198*** (0.00671)
Constant	-0.194*** (0.0101)	
Observations	1,185	1,185

Standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

SOURCE: AUTHOR.FROM BIEN DATASET

8.4. Energy retrofit cost analysis

TABLE 23. REAL CASES UPFRONT COSTS PER HOUSING TYPE, CONSTRUCTION PERIOD AND HEATING TYPE

Housing Type	Initial Energy Consumption (kWep/m ² /year)	Energy Label (before=> after)	Energy Consumption after retrofits (kWep/m ² /year)	Energy Gain (kWep/m ² /year)	Surface	Global Investment Cost	Investment /m ²
LC 1960 Gas	275	E=>B	82	193	50	12 258 €	245 €
LC 1970 Heat	205	D=>B	73	132	50	32 223 €	644 €
LC 1975 Gas	344	F=>B	86	258	68	28 816 €	424 €
LC 1985 Elec	240	E=>B	83	157	70	33 508 €	479 €
MI 1981 Elec	490	G=>B	86	404	104	48 348 €	465 €
LC 1970 Fuel	285	E=>B	75	210	106	20 747 €	196 €
MI 1975 Gas	317	F=>B	86	231	128	55 716 €	435 €
MI 1955 Fuel	400	F=>C	115	285	136	37 000 €	272 €

SOURCE: ADEME DATA, CALCULATION FROM AUTHOR

NOTES: CASES ARE OBTAINED FROM ADEME IN 2010 FOR INDIVIDUAL HOUSES (MI) AND COLLECTIVE DWELLINGS (LC) ACCORDING TO THE MAIN HEATING TYPE (ELECTRIC, GAS, FUEL AND CENTRAL HEATING)

CHAPITRE 3. LES ENJEUX DE LA TRANSITION ENERGETIQUE POUR LE SECTEUR FINANCIER

Certains développements figurant dans ce chapitre ont fait l'objet d'une présentation sous la forme d'un article intitulé "How to assess environmental systemic risks? A New Prudential Regulatory Framework" lors de la conférence internationale Latin American Energy Economics Meeting à Rio de Janeiro (Brésil) en avril 2017. Il reprend également quelques éléments figurant dans Leboullenger et Hache (2016).

1. Introduction

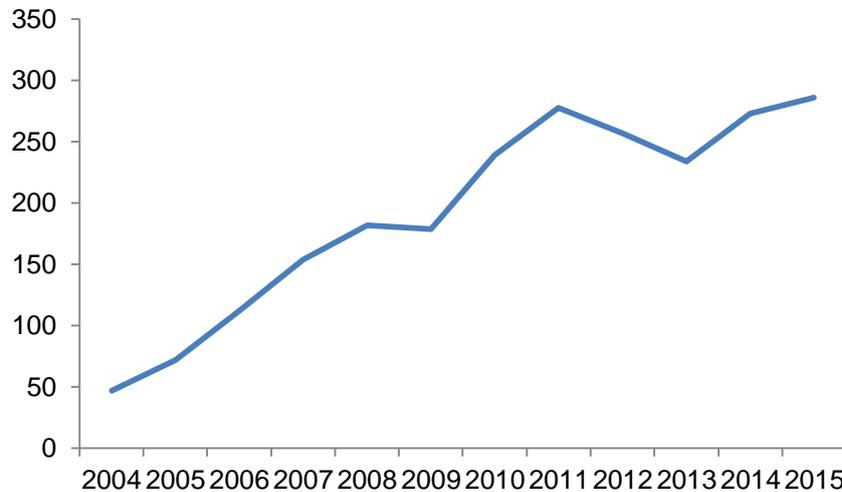
Nous savons qu'il existe un besoin d'investissement massif, immédiat et de long terme, pour parvenir à une transition énergétique vertueuse. Il s'agit de décarboner l'offre énergétique primaire et secondaire, d'améliorer la maîtrise de la demande et l'efficacité des systèmes énergétiques et de proposer des infrastructures performantes et adaptées à une économie décarbonée et ce dans des secteurs clés comme l'industrie, le transport et le logement. Comme le rappelle Mireille Martini et Alain Grandjean dans leur livre « Financer la Transition Énergétique » (Grandjean et al. 2016); il y a deux manières de financer des grands projets d'infrastructure durables : l'impulsion publique et étatique directe (allocation budgétaire) et le comportement des agents privés. La capacité d'investissement d'un Etat est régie par sa possibilité de créer de la monnaie et d'emprunter sur les marchés. Cette capacité est autocontrainte par la stabilité financière indispensable en économie ouverte aux échanges internationaux et la réputation de bon payeur que veut conserver chaque Etat. La seconde, la capacité d'investissement privée est, elle, orientée selon les fondamentaux des marchés financiers (volume de liquidité, prix du risque et du temps) et encadrée par les autorités monétaires qui fixent le taux d'intérêt directeur et décide du volume et de la nature de la liquidité sur les marchés. Pour orchestrer une transition énergétique, les pouvoirs publics doivent, dans un premier temps, mettre en place des outils fiscaux, budgétaires et informationnels suffisamment efficaces pour orienter les investissements publics et privés vers la décarbonisation. Ils doivent, dans un second temps, favoriser l'intégration des enjeux climatiques au sein des marchés privés, en particulier des marchés financiers.

Le contexte économique actuel semble avoir une dynamique favorable à l'investissement bas-carbone. Son volume atteint un nouveau record à près de 286 milliards de dollars⁵¹ en 2015 selon le dernier rapport de l'UNEP⁵², *Global Trend in Renewable Energy Investment*. Les investissements ENR dans les capacités électriques ont atteint près de 266 milliards de dollars, soit plus du double du montant observé pour les investissements réalisés dans les centrales à charbon et à gaz (130 milliards de dollars) (Figure 20).

⁵¹ Ce chiffre comprend les investissements dans les capacités additionnelles, dans les nouvelles technologies et dans la R&D.

⁵² *United Nations Environment Programme*, <http://fs-unep-centre.org/publications/global-trends-renewable-energy-investment-2016>, 24 mars 2016.

FIGURE 20 : INVESTISSEMENT TOTAL DANS LES ENERGIES RENOUVELABLES (EN MILLIARDS DE DOLLARS)



SOURCES : LEBoulLENGER ET HACHE (2016), D'APRES LES CHIFFRES DE L'UNEP ET BLOOMBERG ENERGY FINANCE

Si la tendance conforte les politiques énergétiques en place, d'ici à 2035 les investissements mondiaux annuels en fourniture d'énergie primaire atteindront 2 000 Mds\$ et les investissements en efficacité énergétique vont atteindre les 550 Md\$ par an (AIE, *World Energy Investment Outlook*, 2015). L'UE (27% soit 2100 Mds\$), les Etats-Unis (20% soit 1300 Mds\$) et la Chine (21%, 1500 Mds\$) porteront à eux seuls les deux tiers des investissements. Cela représente un investissement cumulé entre 2013 et 2035 de 48 000 Md\$. Ce montant se répartit en 40 000 Md\$ pour la fourniture d'énergie primaire et 8000 Mds\$ d'investissements pour l'efficacité énergétique qui se concentrent dans le secteur des transports (60%) et du bâtiment (30%). Parmi la fourniture en énergie primaire, 7000 Mds\$ sont consacrés aux réseaux, et encore plus de la moitié (23 000 Mds\$) est consacrée aux énergies fossiles (extraction, transport et raffinage). Un quart (10 000 Md\$) des investissements sont dédiés à la fourniture d'électricité. Parmi eux, 6000 Md\$ sont dédiés aux énergies renouvelables et 1 000 Mds\$ au nucléaire.

Mais cela n'est pas suffisant. Afin de respecter les exigences de la COP 21 en matière de lutte contre le réchauffement, l'AIE prévoit que les investissements en énergies bas-carbone doivent être multipliés par un facteur 3, et que les investissements en efficacité énergétique doivent être multipliés par un facteur 8 entre 2013 et 2035 par rapport à la tendance actuelle. Le rapport Calderon-Stern parle d'un besoin d'investissement d'ici à 2030 de l'ordre de 90 000 Mds\$ (Stern and Calderon 2015).

La question du financement privé intermédié de la transition énergétique reste donc un enjeu majeur. Pour cela, deux points sont fondamentaux. Il faut encourager et valoriser l'investissement privé et donc l'alignement des flux financiers vers une économie compatible avec une trajectoire de réchauffement contenue à moins de 2°C. Il faut aussi évaluer la compatibilité et la résilience des actifs financiers existants, stockés au bilan des institutions financières, à une transition bas-carbone. Cela suppose de repenser la valorisation privée de l'environnement et des services écologiques rendus à coût marginal nul à l'aune de leur coût d'opportunité (volet investissement) et de leur profil de risque (volet bilanciel). Afin d'atteindre l'optimum social attendu par la transition énergétique, les agents financiers privés mais également leurs instances de régulation financière et bancaire ont un rôle déterminant à jouer.

La création d'une valeur carbone constitue une étape nécessaire afin d'intégrer les externalités négatives contributives au changement climatique retardant la transition énergétique. La valeur sociale du carbone peut se comprendre comme la valeur accordée en matière de « bien-être » d'une tonne de carbone non émise. C'est une valeur « internalisée » faisant référence à une croissance optimale qui ne peut être atteinte s'il subsiste des déséquilibres liés à la dégradation du climat. Ces déséquilibres sont ainsi une « externalité » qu'il faut « internaliser » dans le calcul économique. En France, les travaux pionniers dans ce domaine proviennent du rapport Quinet⁵³ qui constitue l'un des premiers appels à la création d'une valeur carbone, appelée alors « valeur tutélaire du carbone ».

Dans ce chapitre, nous ne chercherons pas à déterminer la part effective de la transition énergétique bas-carbone dans la lutte contre le changement climatique et postulerons simplement qu'elle est prépondérante⁵⁴. Ce chapitre s'attèle plutôt à réunir les faits et éléments qui poussent nos systèmes, et en particulier nos systèmes financiers, à opter pour une nouvelle manière de valoriser le carbone et la transition énergétique. Les questions des risques et du champ de perception et d'action des différents acteurs du système financier, ont donc retenu l'attention prioritaire dans ces recherches. Nous établirons d'abord un lien entre l'émergence d'une nouvelle famille de risques au sein de la sphère financière, avec une attention particulière portée à la sphère bancaire, et la valorisation de la transition énergétique par les acteurs privés. Après avoir rappelé les mécanismes de formation d'un signal prix du carbone exogène aux marchés (section 2) nous verrons dans quelle mesure une valeur carbone intrinsèque aux marchés financiers peut prendre la

⁵³ Rapport publié en 2009 à la demande du Premier ministre par le Centre d'analyse stratégique et présidé par Alain Quinet

⁵⁴ La contribution des autres gaz à effet de serre comme le méthane ou les nitrates implique de se pencher également sur la nécessité de réfléchir à l'avenir de certaines filières clés comme l'agriculture, l'élevage et la responsabilité des standards de consommations dans leur contribution au surplus de GES par rapport à l'optimum.

forme d'une prime de risque (section 3). Les définitions, caractéristiques et outils de prévention du risque systémique financier y seront également adaptés au contexte climatique. La section 3.4 fournit des éléments pratiques afin d'évaluer l'exposition du secteur bancaire aux divers risques climatiques. Enfin la section 5 prend le point de vue du régulateur financier et bancaire et analyse le rôle de ce dernier dans l'intégration des risques climatiques au sein de la sphère financière et bancaire. Nous concluons (section 0) que la transition énergétique bas-carbone peut être financée par la sphère financière, en particulier bancaire, pour peu que l'ensemble des acteurs du secteur, décideurs publics nationaux, supranationaux, institutions financières publiques et privées mais également les autorités de régulation et de contrôle prudentiel, prennent en compte les enjeux climatiques dans leurs agendas.

2. Une valeur sociale du carbone peut-elle être générée sur les marchés financiers?

Le climat et l'environnement font partie de la catégorie des biens communs dont la gestion doit sans nul doute s'opérer, grâce à une tierce intervention, par l'intégration des externalités négatives engendrées par les arbitrages privés. Dans sa « tragédie des biens communs », Garret Hardin décrit le problème comme l'issue d'un jeu non coopératif qui démontre que les individus finissent par surexploiter un bien à partir du moment où son utilisation est gratuite et non restrictive. « *Le problème des communs n'appelle pas une solution technique mais une fondamentale extension de la moralité* »⁵⁵ (Hardin, 1968). Dans son ouvrage « La logique de l'action collective » (Olson, et al., 2011) nous explique le paradoxe selon lequel ce n'est pas parce qu'une action est bonne collectivement, au sens où elle bénéficie à tous, qu'elle est entreprise. C'est d'autant moins le cas lorsque les forces en présence sont composées, d'une part, d'un groupe petit mais organisé et ayant beaucoup à perdre et, d'autre part, d'une multitude (qui peut être celle des 7 milliards de personnes composant l'humanité moins le petit groupe) dont chaque personne la composant a des perspectives d'utilité imperceptibles ou du moins très limitées⁵⁶.

Pour autant, peut-on également tenir un raisonnement similaire pour la transition énergétique, définie comme la trajectoire vers un système économique et écologique cessant de contribuer à un

⁵⁵ De l'anglais « The population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality ».

⁵⁶ Prenons l'exemple emprunté à Ekeland (2015) d'une taxe carbone fixée sur les carburants pétroliers: alors que les ménages supportent un coût, et respectivement une augmentation des services publics, à hauteur de 1€ tous les 1000 km, Total subit une augmentation de son coût final de distribution de plusieurs milliards d'euros. Le poids de la charge de la taxe est diffus d'un côté et hautement concentré de l'autre ce qui incite davantage l'agent qui concentre les prélèvements à l'action et au lobby que chaque agent individuel qui supporte une infime partie du bénéfice redistribué, d'autant plus si ce dernier est sous la forme non monétaire d'un service environnemental.

changement climatique néfaste, mais aussi pour tous les éléments qui la sous-tendent ? En d'autres termes, la transition énergétique est-elle un bien public dans le sens donné par Samuelson (1954), à savoir qu'il est non-appropriable (la consommation de ce bien par un usager n'entraîne aucune réduction de sa disponibilité pour d'autres usagers, il ne peut pas appartenir à une personne en propre) et non-exclusif (il est impossible d'exclure quiconque de la consommation de ce bien et, par conséquent, impossible d'en faire payer l'usage) ? Si l'on considère la transition énergétique comme un bien public, on doit alors admettre que, comme tout type de bien dont l'offre est indivisible, elle génère le phénomène de « passager clandestin » qui empêche à l'offre de s'équilibrer à un coût marginal positif. Dès lors elle ne peut qu'être en tout ou partie prise en charge et administrée par les pouvoirs publics faute de quoi il est impossible d'en générer une valeur sur le marché et toute tentative de constitution d'un marché privé (c'est-à-dire sous l'autorité d'institutions non publiques) de la transition énergétique se voit anéantie.

La prise en charge étatique peut être totale mais pas obligatoirement ; elle peut aussi jouer avec la complémentarité de l'action privée. Coase (1974) nous rappelle de nous méfier lorsque l'on parle de bien public et que par généralisation, on prône à tout prix la création d'une institution financée par la taxe pour régler un problème de passager clandestin. Il démontre, à travers son exemple de l'éclairage des phares dans l'Angleterre du 17^e au 19^e siècle, qu'un bien public (ici l'éclairage et donc la sécurité des bateaux entrant dans les ports anglais) peut être lucrativement financé, organisé par la sphère privée et le rôle de l'Etat être cantonné à l'établissement et la mise en vigueur de droits de propriété dont le prix reflète la valeur d'usage et non le seul coût marginal. Coase n'est pas seul à relativiser le rôle de l'Etat. Selon (Ostrom 2015), la protection d'un bien commun environnemental exige l'alignement des intérêts des parties prenantes mais sans forcément avoir recours à l'intervention étatique. Cela ne peut toutefois, selon elle, être obtenu que dans le cadre d'une gouvernance participative⁵⁷. Elinor Ostrom exclut en revanche que la gestion d'un bien commun passe par son appropriation privée et rejette ici la solution par la propriété privée. Les biens communs sont certes autogérés par les parties prenantes privées mais ces dernières n'en sont pas propriétaires.

Il existe donc une voie « théorique » pour le développement d'un marché privé de la transition énergétique, notamment celui qui passe par une collaboration entre institutions publiques qui peuvent se voir incomber la gestion de la propriété environnementale, et des institutions d'investissement et de financement privées, en charge de développer une offre pertinente

⁵⁷ L'auteure avait alors pour référence la gestion de parcs naturels et de lieux de préservation à gestion commune raisonnée (Yellowstone aux États-Unis, Rocky Mountain au Canada transformé dès 1885)

rémunérée à la valeur d'usage. Reste à déterminer cette valeur. Ici aussi le choix peut se restreindre à l'établissement d'un prix exogène aux marchés, ou au contraire s'ouvrir à la formation d'un prix complémentaire plus endogène qui prendrait d'autres formes que celle d'une taxe ou d'un droit de propriété. Cette approche, complémentaire, peut apporter une solution à une autre « tragédie », dite « tragédie des horizons », telle qu'évoquée par l'économiste Ivar Ekeland (2015) et le banquier central Mark Carney (2015).

La « tragédie temporelle » à l'œuvre entre le climat et nos économies est mise en image au travers du « *Syndrome de la Grenouille* » décrit par Ekeland (2015) dans son ouvrage éponyme. « Une malheureuse grenouille mise à cuire dans une marmite tolère une élévation régulière de la température de l'eau, alors qu'un ébouillantage brutal la ferait réagir aussitôt. De même, le réchauffement climatique est insidieux : il n'est perceptible qu'à l'échelle de la décennie, voire du siècle, n'implique aucune décision urgente et, de fait, est régulièrement repoussé sur l'agenda des politiques dont l'horizon excède rarement quelques années. »

C'est tout l'enjeu des taux d'actualisation : une politique climatique nécessite des investissements lourds dès aujourd'hui alors que ses bénéficiaires, qui se feront sentir de manière certaine sur une période de plus de 200 ans, seront au mieux perceptibles à l'horizon de 25 ans. Le problème des horizons évoque la dualité des taux d'actualisation entre marché et environnement mise en évidence par (Stern, 2006) : 1 million d'euros dans 100 ans valent encore aujourd'hui 370 000 euros au taux annuel de 1% mais moins de 1000 euros si le taux d'intérêt est de 10%. Le taux d'actualisation écologique reflète l'importance de la préservation des ressources naturelles et environnementales à très long terme dans une optique de réciprocité avec les générations futures, par rapport à la consommation et le gain soutiré des générations actuelles. A l'inverse, l'approche court termiste des marchés, en particulier celle des marchés financiers, naît de la large préférence des agents privés pour le présent et se traduit par des taux d'escompte très élevés. La diversité avérée (Guéant et al., 2010) des taux d'actualisation environnementaux et économiques et l'écart entre ces derniers (le taux d'actualisation écologique est toujours inférieur au taux d'actualisation économique) sont un frein bien connu à la création d'un prix du carbone efficace. Cette épineuse question souffre d'un manque de consensus parmi les économistes comme l'illustrent statistiquement Weitzman (1998) et, de manière plus actuelle, les débats entre les économistes du climat Stern (2007) et Nordhaus (2010). Le premier préconise un taux d'actualisation faible (1,4 %) qui prend en compte les intérêts des générations futures, alors que le second privilégie un taux élevé qui reflète des considérations actuelles de marché et la préférence des individus pour le présent (et donc la mainmise d'une génération sur la suivante). Un taux d'actualisation élevé

traduit également l'optimisme quant à l'essor du progrès technique qui dicte qu'il est moins coûteux d'investir demain plutôt qu'aujourd'hui car les solutions technologiques seront plus efficaces demain qu'aujourd'hui. Une variante plus subtile des tenants de l'optimisme, naturellement plébiscitée par une partie de la communauté scientifique, suggère de concentrer les investissements sur la recherche afin d'accélérer cet essor. Malgré le vif intérêt que suscitent ces débats pour un économiste⁵⁸, ce chapitre se concentre sur les aspects pratiques des besoins et enjeux de la transition énergétique. Cette question est cruciale car en pratique, c'est bien encore aujourd'hui l'équilibre de l'offre et de la demande sur le marché de la dette qui détermine le taux d'intérêt du marché et non le principe de bienveillance pour les générations futures préconisé par le rapport Stern. Ce dernier a chuté en 25 ans de 10 % à 1 %, si bien qu'aujourd'hui, un taux d'actualisation de 6 % (taux préconisé par Nordhaus en 1994), de 4% dans le rapport d'Alain Quinet ou encore de 5 % comme celui fixé par le Consensus de Copenhague en 2009 (outil fort vraisemblable de son échec) n'est plus utilisé. De même, à ce jour, il n'existe pas de prix universel du carbone, ni de courbe de dommages « à la Nordhaus » (Pottier, 2014).

2.1. Signal prix explicite exogène : taxe et permis

D'un point de vue de concepteur de mécanismes interventionnistes, il existe deux systèmes pour donner une valeur au carbone : la taxe ou le permis.

2.1.1. La taxe carbone pigouvienne

Les « taxes pigouviennes » ont pour but d'internaliser les externalités en pénalisant financièrement le recours aux solutions les plus coûteuses socialement. Prenons à titre d'exemple le cas du charbon. L'application d'une taxe permet de révéler le coût réel de l'utilisation du charbon et de rendre davantage compétitives des technologies plus propres mais plus onéreuses à première vue qu'elles soient renouvelables comme l'énergie du vent, du soleil et de la biomasse, ou fossiles comme le gaz naturel (qui émet beaucoup moins de GES et de particules fines) ou le nucléaire (qui pose d'autres problèmes y compris environnementaux mais n'émet pas de GES au stade de la production directe d'électricité). Cela permet aussi de promouvoir l'efficacité énergétique (car moins on consomme d'énergie par unité produite, moins l'on paye de taxe). Il s'agit donc d'un système qui intervient sur les prix. Le dispositif peut contrôler le niveau des prix et le montant de l'externalité mais son effet sur le niveau de pollution effectif n'est pas assuré. En effet, la présence

⁵⁸ Notons à ce sujet que d'après Bolton (2016), la question des taux d'actualisation qui anime Nordhaus et Stern n'est pas la bonne. En effet, le secteur de la finance nous dit que lorsque les pertes sont incertaines, les actifs concernés sont majorés d'une prime de risque qui correspond à l'évaluation que se font les acteurs des pertes potentielles. Le taux d'actualisation des investissements verts doit donc être équivalent au taux de retour attendu d'un actif ayant le même profil de risque. Les questions sont alors de déterminer le prix de marché des risques liés au changement climatique et de vérifier que le marché les intègre correctement aux premiums des actifs concernés.

d'une taxe peut orienter à la baisse la demande sur le marché si celle-ci est sensible au prix et dispose d'alternatives rentables. Pour beaucoup de marchés à forte intensité capitalistique et dominés par une seule technologie (transport, industrie), le montant de la taxe doit être suffisamment élevé pour générer des solutions alternatives accessibles sans pour autant asphyxier le secteur ou les consommateurs. Cette question est encore au cœur de beaucoup de débats nationaux aujourd'hui et la taxe souffre d'un problème d'acceptabilité de la part des acteurs privés.

2.1.2. Les marchés de « permis à polluer » coasiens

Les marchés de « droits à polluer » vont, quant à eux jouer sur la quantité totale de pollution disponible sur un marché donné et non plus sur le prix par unité de pollution (ou par tonne de CO₂) émise. Le principe est de limiter la quantité totale de pollution autorisée et de répartir ces montants entre les différents acteurs sous forme de droits à polluer. Ils découlent de l'application du théorème de Coase selon lequel il est possible d'obtenir une allocation optimale des externalités à condition que les droits de propriété soient clairement définis. C'est une alternative qui permet d'orienter le marché sans contraindre fiscalement les choix des acteurs ni artificiellement jouer sur les prix. Dans le cas du marché carbone, l'impact sur l'environnement est maîtrisé car le volume total de GES émis est plafonné, mais le prix de marché de la tonne de CO₂ est quant à lui librement fixé par le marché et reflète un juste prix qui favorise les technologies bas-carbone. En effet, les producteurs polluant moins que leur quota ont la possibilité de revendre leur excédent aux producteurs moins efficaces (principe du « *cap and trade* ») rétribuant ainsi l'usage d'une activité moins consommatrice en CO₂. Il existe plus de 40 marchés du carbone au niveau international et, ne touchant que quelques secteurs d'activité, ils couvrent 12% des émissions mondiales.

L'inconvénient majeur de ce type d'outil est très bien illustré par le marché européen d'échange de quotas carbone (EU ETS⁵⁹). Lancé en 2005, en réponse aux engagements de l'UE dans le protocole de Kyoto (1997), le marché européen du CO₂ concerne en 2015 plus de 11 000 installations énergétiques et industrielles et couvre plus de la moitié des émissions de CO₂ européennes. Après un pic de cotation qui a dépassé 30 € la tonne en juillet 2008, le cours du CO₂ se situe aujourd'hui à des niveaux très bas, oscillant entre 3€ et 6 € la tonne depuis le début de l'année 2013. En effet, lors de l'attribution du volume global et de la répartition des droits, il était impossible de prévoir le coût ainsi que le niveau de la demande globale auquel allait s'ajuster l'offre de production énergétique. Entre la fixation de quotas généreux pour forcer le consensus (notamment auprès des acteurs de l'ancienne Europe de l'Est) et l'irruption de la crise financière puis industrielle de 2008, le volume de droits attribué s'est avéré rétrospectivement bien trop élevé

⁵⁹ EU Emission Trading System.

car presque tous les producteurs ont été à même de respecter leurs quotas, y compris les plus polluants. Les prix sont naturellement devenus tellement faibles que le signal économique a perdu son sens⁶⁰.

Toutefois, alors que le marché EU ETS peine à se relever de ce sentiment d'échec, il existe des exemples de marchés de GES florissants, certes de plus petite échelle : régionaux et/ou bilatéraux. A titre d'exemple, la Californie sur son marché régional, affiche le prix de la tonne du CO₂ le plus élevé (alors que les USA se sont retirés du protocole de Kyoto) et plusieurs provinces chinoises (étant noté que chaque province chinoise renferme une population aussi nombreuse que l'Allemagne) ont également développé des marchés bilatéraux satisfaisants. L'émergence d'un marché de permis piloté au niveau mondial par une organisation multilatérale comme l'OMC ou le FMI, ainsi que cela est proposé par le prix Nobel d'économie 2014 Jean Tirole, peut donc malgré tout être envisagée. Un tel marché offre un pilotage international de valorisation du carbone et des permis d'émissions et il apporte une solution au débat entre anciens et nouveaux pays industrialisés sur la responsabilité du stock de GES déjà émis. L'attribution gratuite de permis aux pays émergents créerait des possibilités de compensation et de prise de responsabilité de la part des pollueurs historiques tout en favorisant un rattrapage économique décarboné. Il reste cependant des écueils. D'une part, pour s'assurer de la pérennité de ce système, il faut veiller à ne pas créer d'effet de transfert brutal de pollution, délocalisée notamment dans les pays en développement nouvellement dotés de permis gratuits. D'autre part, si l'approche des permis évalue sans le surestimer l'investissement global souhaité à partir d'un budget carbone donné, elle peut créer un biais sectoriel en faveur des services et pénaliser l'industrie lourde et énergivore aux effets difficiles à évaluer mais probablement très importants⁶¹.

2.2. Signal prix implicite : l'exigence de transparence

Un prix implicite est un signal qui agit comme une incitation directe, non pas à valoriser les projets selon leur impact carbone, mais à déceler le coût d'opportunité associé à ceux-ci. L'enjeu est ici de donner une information plutôt qu'un prix qui va influencer sur le processus de décision. En quoi l'information peut révéler la valeur sociale du carbone ? Ses partisans considèrent qu'elle permet à la société civile d'interpeller publiquement les pollueurs, assimilés en général aux entreprises. C'est la théorie du « *name and shame* ». L'impact de leur activité en matière environnementale sur leur réputation est censé les conduire à des comportements plus vertueux, soit de nature négative

⁶⁰ Notons que le discrédit sur ce mécanisme a en outre été accentué par l'apparition de passagers clandestins profitant de la complexité du dispositif pour monter des escroqueries à la TVA au détriment des Etats.

⁶¹ Il n'est qu'à regarder l'impact en France de sa désindustrialisation.

(ne plus financer d'activités responsables du réchauffement climatique comme l'industrie extractive de charbon), soit de façon positive (être un acteur majeur de la finance verte : des *cleantechs*, du secteur des énergies renouvelables...).

Cette mesure tendant à réclamer aux entreprises une information extra-financière couvrant aussi les aspects environnementaux est relativement ancienne en France. La loi sur les « Nouvelles réglementations économiques » -dite « loi NRE »-, adoptée en 2001, avait déjà exigé des entreprises cotées qu'elles présentent des rapports extra-financiers dans le domaine social, environnemental et de gouvernance. Dès lors se sont développés les critères « ESG », qui correspondent aux questions environnementales, sociales et de gouvernance au sein des entreprises privées et donc aussi des institutions financières. En 2009 et 2010, deux lois dites « Grenelle de l'environnement », avaient rendu obligatoire la production d'un rapport annuel sur les questions de Responsabilité sociale des entreprises (RSE) pour toutes les grandes entreprises exerçant des activités en France. Ce mouvement est désormais généralisé dans toute l'Union européenne. En vertu de la Directive 2013/34/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 (directive relative aux états financiers annuels, aux états financiers consolidés et aux rapports y afférant de certaines formes d'entreprises), les sociétés cotées, les banques et compagnies d'assurance, et les entreprises de plus de 500 salariés sont appelées à communiquer dans leurs rapports de gestion des informations utiles sur leurs politiques, les principaux risques liés et les résultats obtenus en ce qui concerne les critères RSE. Ce rapport, souvent appelé rapport « développement durable », fut cependant le plus souvent publié à part des autres rapports financiers et stratégiques et leur impact est resté longtemps marginal hors des cercles spécialisés.

L'intégration plus poussée de l'ensemble des acteurs du système financier et bancaire dans ce processus de transparence est encore plus récente et connaît des développements importants depuis 2015. Deux propositions concrètes ont vu le jour dans le sillage de la COP21 et l'accord de Paris : la constitution d'une *Task Force* sur les « divulgations financières climato-compatibles » et la mise en place d'une obligation de *reporting* (premier prix implicite contraignant) souhaitée par le gouvernement⁶² français et introduite à l'article 173 de la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte, votée en août 2015 (ci-après référée LTECV dans le texte).

⁶² La loi reste l'expression de la Nation *via* le parlement et non de l'exécutif, même si en l'espèce le projet était gouvernemental à l'origine.

2.2.1. Task Force on Climate related Disclosures (TCFD)

Gouverneur de la banque d'Angleterre, *chair* du comité de stabilité financière (FSB), et voix charismatique de la finance climat⁶³, Mark Carney a créé, en décembre 2015, un groupe de travail sur les divulgations financières liées au climat (TCFD). Ce groupe doit fournir des informations "comparables, fiables, claires et efficaces" aux prêteurs, aux assureurs et aux investisseurs. La TCFD, dirigée par Michael Bloomberg, divulgue dans son premier rapport du 31 mars 2016 un inventaire des initiatives existantes. Le rapport met l'accent sur la diversité des stratégies adoptées et la difficulté d'harmoniser ou même de comparer les différentes métriques en l'absence de règles de conduite et de bonne pratique faisant référence. Il existe aujourd'hui plus de 400 dispositifs de diffusion d'informations relatives au climat. Il est ainsi nécessaire d'avoir un système de publication homogène, incitatif et pertinent qui fasse foi dans le système international de valorisation d'actifs.

La mise en place d'un prix implicite exogène peut être la généralisation de l'obligation de délivrer une information dite « extra-financière », qui couvre les questions environnementales. Elle conduit le secteur financier à se préoccuper davantage encore des conséquences environnementales de ses activités de financement, d'investissement et de crédit.

2.2.2. Article 173 de la Loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV)

La France fait office de précurseur en matière de transparence de par l'application de l'article 173 de la LTECV. C'est le premier pays à l'échelle mondiale à intégrer les enjeux environnementaux aussi profondément au sein du cadre réglementaire bancaire et financier. L'article amorce un changement de stratégie quant à l'intégration des risques climatiques dans l'activité même des institutions financières. La loi agit sur deux points qui se veulent performatifs : la transparence et l'internalisation des risques.

Les dispositions III à VI de l'article visent à impliquer plus encore les acteurs privés (entreprises et institutions financières) dans le respect des engagements internationaux et nationaux en matière de lutte contre le réchauffement climatique. Rendre obligatoire la divulgation de l'empreinte carbone des stratégies, portefeuilles et bilans des acteurs de marché vise à créer de l'information publique permettant la réallocation de la part des marchés eux-mêmes, des flux financiers vers des actifs compatibles avec une croissance bas-carbone. A partir de 2017, pas moins de 840 investisseurs institutionnels devront expliquer quelle est leur politique d'investissement responsable et intégrer

⁶³ <http://www.bankofengland.co.uk/publications/Pages/speeches/2015/844.aspx>

les critères ESG dans leur communication publique. Parmi eux, une soixantaine d'investisseurs institutionnels (qui ont plus de 500 Mds€ de bilan consolidé) ont des obligations de *reporting* qui porteront également sur leur gestion des risques climatiques et leur contribution au financement de l'économie verte. Ces nouvelles informations pourront être évaluées à la fois par les pouvoirs publics et les ONG⁶⁴ afin de développer une expertise dans ce domaine et d'élaborer un code, du moins un *benchmark* des meilleures pratiques observées, pour aider les investisseurs à mieux s'engager pour atteindre les objectifs de décarbonation de leurs portefeuilles.

La disposition V de l'article 173 de la LTECV est spécifiquement réservée aux banques. La loi vise une intégration des risques climatiques au sein de la cartographie interne des risques du secteur bancaire par l'intronisation d'un stress-test climatique spécifique. La résilience des établissements bancaires vue par leur exposition, l'allocation et l'adaptation du portefeuille de crédits existant va être évaluée sous un nouvel angle, celui du changement climatique et de la transition énergétique bas-carbone. Cette nouvelle mesure de la résilience bancaire, mise en lumière par un test de résistance aux chocs climatiques peut favoriser l'émergence d'un signal prix plus endogène au marché financier et qui prendrait la forme d'une prime de risque. Ce nouveau système de valorisation de la transition énergétique bas-carbone, complémentaire avec un système de prix implicite par transparence est le concept que nous allons développer dans la section suivante.

3. L'intégration des risques climatiques dans le secteur financier

Il existe donc une troisième voie, qui, en l'absence d'accord contraignant sur un prix du carbone universel ou la mise en place d'un marché de permis mondial efficace, permet de lui attribuer une valeur endogène aux marchés. En effet, la prise en compte d'une nouvelle famille de risques peut aussi générer une valeur carbone endogène aux marchés financiers qui permettra l'alignement des flux financiers vers des actifs compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris.

Les risques individuels, liés au changement climatique et à la transition énergétique peuvent prendre trois formes : (i) des risques climatiques physiques issus de la matérialisation des perturbations et des chocs climatiques ; (ii) des risques dits de transition, liés à la mise en place d'une transition énergétique bas-carbone afin de prévenir les perturbations climatiques ; et (iii) des

⁶⁴ En ce sens, de nouveaux acteurs voient le jour comme le groupe *Energy Transition Risk*, un consortium créé en mars 2016 financé par le programme Horizon 2020 de la Commission européenne et coordonné par le *think tank français* « 2° Investing Initiative » (2°ii), comprenant Standard & Poor's, Kepler Chevreux, I4CE (ex-CDC Climat Recherche) et le programme "Sustainable Finance" de l'Université d'Oxford.

risques fiduciaires, liés à la responsabilité des institutions de n'avoir pas su anticiper et contrer les effets néfastes d'un choc climatique sur les patrimoines et les flux financiers qu'elles avaient en gestion ; et enfin (iv) un risque climatique systémique. Nous exprimerons d'abord en quoi ces risques ainsi définis concernent directement les institutions financières à moyen terme, puis nous présenterons les canaux et mécanismes de transmission directs, indirects et croisés entre ces différents risques et les agents qui les portent, qu'ils soient économiques ou financiers.

3.1. Le risque climatique physique

3.1.1. Conséquences physiques du réchauffement climatique

Les risques climatiques physiques peuvent se comprendre comme le risque de stress et de pertes que peuvent subir les systèmes énergétiques, naturels, humains et économiques face à des phénomènes naturels catastrophiques (inondations, canicules...) ou tendanciels (érosion, montée des eaux, augmentation des températures moyennes, déclin de la biodiversité...) et qui viennent en altérer le fonctionnement normal. Ces risques sont d'autant plus importants que la capacité des systèmes à recouvrer leur niveau d'équilibre voire à s'adapter à des changements irréversibles est réputé faible.

Les effets les plus certains d'un changement climatique vont être une augmentation du nombre de « jour chauds » et du nombre de « jours froids »⁶⁵. ...). A ce jour, les experts du GIEC ont donc identifié plusieurs facteurs de risques climatiques qui découlent du réchauffement⁶⁶. Ces risques sont liés à la dégradation (i) des systèmes physiques qui touchent les glaciers (fonte), rivières (inondations et assèchement), côtes (érosion ou submersion), (ii) des systèmes biologiques qui répondent de la biodiversité terrestre, marine (acidification des océans) et de la fragilité forestière (risques d'incendie) et enfin (iii) des systèmes humains et économiques qui renferment les risques liés à la production alimentaire (dégradation des rendements) et à la santé humaine (pollution, vagues de canicule) et économique des sociétés.

Au regard de ces facteurs clés, les risques physiques ne touchent pas uniformément toutes les régions du globe (Figure 21). En effet, on constate que l'Europe est un continent relativement peu risqué à court et moyen termes en ce qui concerne les principales conséquences d'un changement

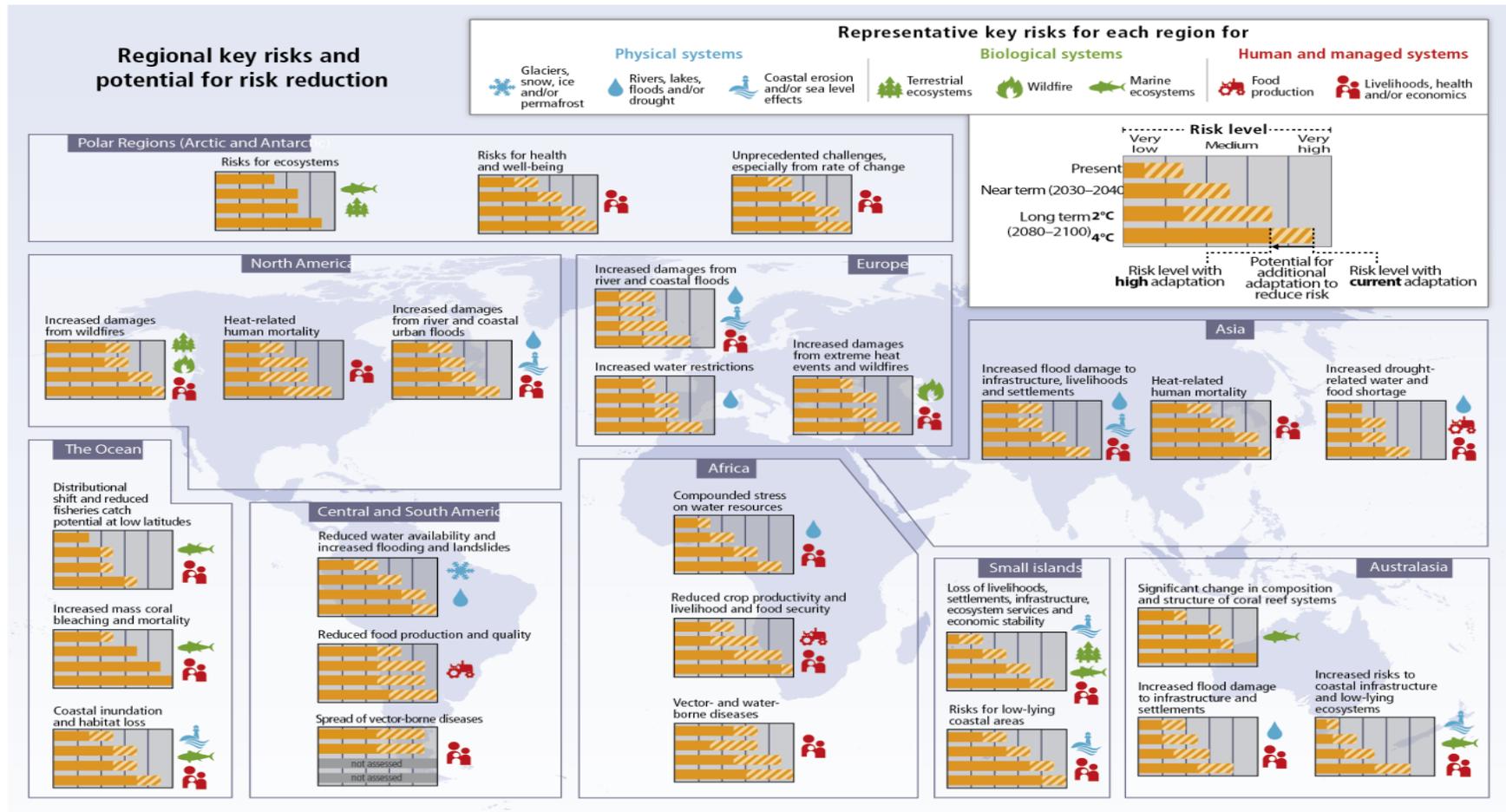
⁶⁵ Il existe un débat sur le degré de certitude associé à la matérialisation des risques climatiques physiques (Pachauri et al. 2014) Les effets sur le volume des précipitations, le risque d'inondations ou de tempêtes sont très incertains car soumis à des dynamiques et des effets de systèmes contradictoires. Notons que ces deux premiers facteurs sont suffisants pour entraîner des dysfonctionnements climatiques graves (vague de canicules, fonte des continents glaciers, montée des eaux, perte de biodiversité, dégradation des rendements agricoles)

⁶⁶ La cartographie de l'ensemble des conséquences du réchauffement sur les éléments de la planète sont présentés en annexes 8.1.

climatique telles une montée des eaux et des inondations. A moyen terme (2030, 2040) l'Europe aura davantage à craindre les effets néfastes du réchauffement climatique via des vagues de canicules (comme on a pu le constater en France en 2003), des incendies et un stress hydrique entraînant des restrictions⁶⁷. Toutefois, dans un contexte de laisser-faire, si la trajectoire d'émission de GES continue de croître de 2 % par an, les experts du GIEC ont démontré que le réchauffement climatique sera de plus en plus important et dont les effets néfastes (chocs et dégradation graduelle) sont exacerbés par la fréquence accrue d'évènements disruptifs majeurs et irréversibles de l'environnement à mesure que sont dépassés des points de non-retour (ou « *tipping points* ») comme la fonte du pergélisol, la dégradation des continents glaciers, la perturbation des grands courants régulateurs, l'acidification des océans etc.

⁶⁷ L'impact potentiellement dévastateur de la perturbation des courants régulateurs (notamment le Gulf Stream), n'est pas attendu à échelle humaine et d'actuaire (GIEC-AR5).

FIGURE 21. REPARTITION PAR ZONE GEOGRAPHIQUE DES PRINCIPAUX RISQUES PHYSIQUES A COURT MOYEN ET LONG TERME



SOURCE : GRAPHIQUE AR5 SPM (IPCC, 2014)

3.1.2. Les conséquences financières directes du changement climatique sur le secteur assurantiel

Relier les risques climatiques physiques et impacts économiques est un exercice complexe car ils agissent sur deux champs ; le champ du catastrophique et le champ de la dégradation graduelle. Les événements climatiques extrêmes ont des impacts immédiats, visibles et souvent désastreux sur les populations, les stocks d'actifs et les écosystèmes économiques dans leur ensemble. Ils sont persistants si la région sinistrée ne dispose pas de la réactivité et de la résilience nécessaire, qu'elle soit économique ou institutionnelle. Les événements climatiques graduels (effets sur le niveau et la saisonnalité des températures atmosphériques et terrestres) ont des conséquences potentiellement bien plus désastreuses, globales et durables car irréversibles, se propageant à l'ensemble de l'écosystème économique. Leurs impacts économiques et financiers sont toutefois très difficiles à mesurer du fait d'abord d'une chaîne de causalité extrêmement complexe à évaluer et ensuite parce que leurs effets sont bien souvent invisibles (altération chimique des sols) ou noyés dans l'aléa (augmentation tendancielle invisible sur le court terme) et souffrant de deux tragédies, celle de la normalité rampante (Diamond, 2002)⁶⁸ et celle des horizons (Carney, 2015).

L'évaluation économique des risques physiques se restreint donc souvent à celle de l'impact des catastrophes naturelles (appelées Cat Nat ou *NatCat* dans sa version anglo-saxonne) sur les acteurs économiques et financiers. La FFA propose un scénario d'évaluation des risques physiques chroniques dont les résultats sont présentés plus bas. Les enseignements sont néanmoins d'intérêt car ils mettent en lumière les mécanismes de transmission des risques de la sphère économique réelle à la sphère financière et au-delà même, de la sphère assurantielle à la sphère bancaire.

Le secteur assurantiel (assureurs et réassureurs) est le premier secteur naturellement et historiquement concerné par les risques climatiques physiques. La couverture des risques de catastrophes naturelles prend une place importante dans leur passif, notamment l'assurance contre les sinistres qui représente près de 40 % du volume des primes des compagnies d'assurance au Royaume Uni (*Prudential Regulation Authority*, 2015). La mesure de ces risques est donc un exercice auquel ils sont historiquement rompus, en particulier les réassureurs⁶⁹ qui prennent en charge la majeure partie des risques liés aux catastrophes naturelles des assureurs traditionnels. Le marché de la réassurance est très concentré, les 10 premiers réassureurs représentent 50 % du

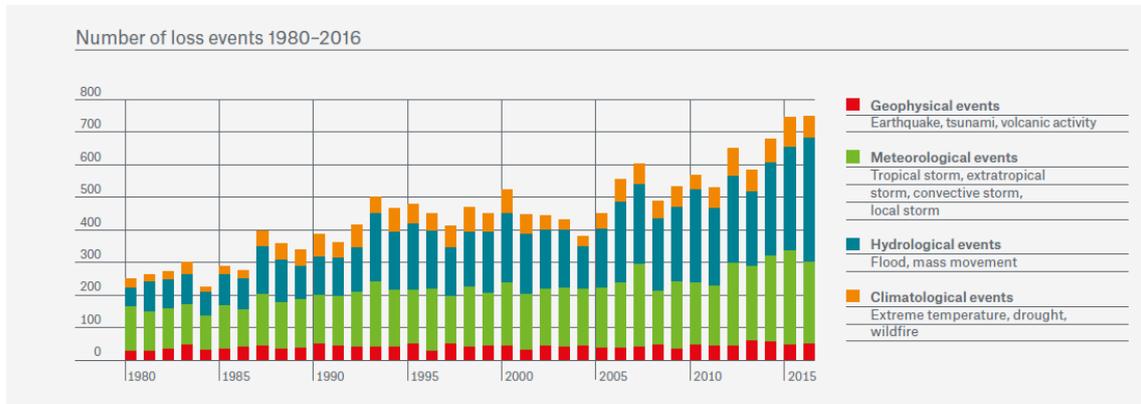
⁶⁸ La normalité rampante fait référence à l'existence d'une apathie résultat de tendances lentes qui font que les repères constituant la « normalité » évoluent graduellement et de façon imperceptible.

⁶⁹ Dans l'ordre décroissant du chiffre d'affaire Munich Ré ; Swiss Ré ; Hannover ; SCOR ; Berkshire ; Lloyds.

marché et les 5 premiers sont des compagnies européennes⁷⁰ (FFA). Ils ont, par conséquent, un portefeuille d'actifs mondialisé et une vision planétaire des risques majeurs dans laquelle l'Europe (l'UE) pèse pour 11% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GIEC).

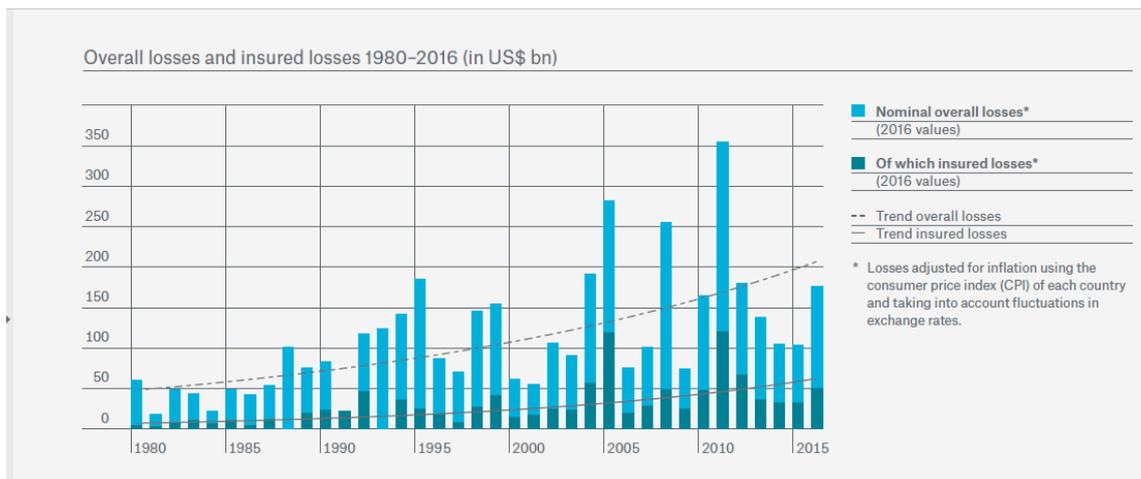
La hausse de fréquence des événements climatiques (inondations, sécheresses, montée des eaux, dégradation des sols et de l'air) constitue autant de risques supplémentaires à absorber par le secteur. Le nombre d'événements naturels indemnisables a triplé depuis les années 1980 (Figure 22), et en 2016, 750 événements ont été recensés comme catastrophes naturelles⁷¹ ; 42 % d'entre eux ont eu lieu en Asie, 22 % en Amérique du Nord, Amérique Centrale et Caraïbes, 12 % en Afrique, 10 % en Europe, 9 % (provoquées en majeure partie par des tremblements de terre en Italie, et des inondations durables ou brutales en France et en Allemagne) en Amérique du Sud, 5 % en Océanie (Munich-Re, 2017). Le montant des pertes enregistrées est également en augmentation tendancielle (Figure 23). L'année 2016 a enregistré un montant important de pertes globales de 175 Mds\$ (un record après trois années plutôt calmes). 84 % des dommages ont été perçus sur les continents nord-américain et asiatique. C'est 50 Mds\$ de plus que la moyenne des pertes annuelles enregistrées entre 2006 et 2015 et 50 Mds\$ de plus que celles enregistrées entre 1986 et 2015 (annexe 8.1). D'autre part, les pertes matérielles associées aux événements de 2016 ont été parmi les cinq plus coûteuses depuis les années 1980 (le record étant enregistré en 2010). En ce qui concerne les pertes imputables aux assureurs au titre du paiement des primes d'assurance, le montant annuel du versement a augmenté de 40 Mds\$ depuis 1980, passant de 10 md\$ à 50 Mds\$, (UK PRA).

FIGURE 22. NOMBRE DE CATASTROPHES NATURELLES ENREGISTREES AU NIVEAU MONDIAL DEPUIS 1980



SOURCE : MUNICH-RE CATNAT SERVICE (2017)

FIGURE 23. PERTES CAUSEES PAR LES CATASTROPHES NATURELLES (ASSUREES ET NON-ASSUREES) ENTRE 1980 ET 2016



SOURCE : MUNICH-RE CATNAT SERVICE (2017)

En ne considérant que les risques liés aux catastrophes naturelles, l'impact économique est fonction de trois causes : des causes techniques, des causes politiques et des causes climatiques. Les risques climatiques physiques augmentent tendanciuellement en raison de l'augmentation de la fréquence d'occurrence des chocs climatiques mais également en raison de l'augmentation du coût et des pertes associées. L'augmentation des coûts des dommages climatiques est liée à trois effets :

- Un effet richesse (pertes liées à la valeur du matériel endommagé de plus en plus importantes) ;
- Un effet démographique (la population est de plus en plus nombreuse) ;

- Un effet de concentration : les hommes et les richesses ont tendance à se concentrer démographiquement et géographiquement dans des zones à risque : littoral, zones volcaniques, mégapoles.

L'ensemble des catastrophes naturelles dénombrées en 2016 ne sont pas toutes issues des conséquences anthropiques du changement climatique. Il s'agit d'une statistique globale, permettant d'évaluer les mécanismes de protection du secteur assurantiel. Afin de mesurer les pertes liées aux événements climatiques imputables directement au changement climatique, la FFA (Fédération Française des Assureurs) s'est prêtée à l'exercice⁷² en 2016. Sur les principaux dommages assurés en France métropolitaine (sécheresses, inondations et tempêtes et les dommages associés sur les biens matériels immobiliers), la FFA prédit un coût supplémentaire du cumul de l'ensemble des périls de 48 à 92 Mds€ au total en 2040 dont 13Mds€ dus aux risques climatiques physiques imputables directement au changement climatique (Fédération Française des Assureurs, 2015).

3.1.3. Les conséquences financières du changement climatique sur le secteur bancaire

Le risque climatique physique impacte le secteur financier dans son ensemble et le secteur bancaire en particulier. Les établissements bancaires sont exposés aux risques climatiques physiques car ils viennent impacter l'évaluation des risques bancaires usuels, en particulier les risques opérationnels (risques portés par les actifs physiques de la banque comme ses agences ou son siège social) et les risques de crédit (risques liés à l'activité de prêt bancaire).

3.1.3.1. Les banques peuvent être exposées directement aux risques physiques via leurs risques opérationnels et le risque de liquidité

Une catastrophe naturelle détruit des actifs et des vies et implique la perte de tout ou partie de l'appareil productif des zones sinistrées. Cela a un effet direct sur l'économie en affectant sa capacité à recouvrer son niveau antérieur au choc et sur les banques, affectées dans leurs capacités à fournir le service bancaire sur le secteur. Les risques climatiques sont identifiés par les risques opérationnels et intégrés à la cartographie réglementaire de Bâle 2 sous la catégorie « dommages aux biens et aux personnes ». Ils se mesurent selon leur impact direct par l'appréciation des dégâts et des dommages subis (destruction matérielle et immobilière) et selon leur impact indirect par l'évaluation des pertes et des coûts d'opportunités subis sur les cash-flows (coût en PNB de l'incapacité de fournir le service et de l'arrêt des activités).

⁷² Les modèles de revenu ont été construits avec l'INSEE (nombre de logements et d'entreprises et valeur unitaire des logements et des entreprises) et les modèles climatiques avec l'institut de Jean Jouzel.

Les banques sont également exposées à un risque physique direct opérationnel lié à la liquidité⁷³. Les risques climatiques peuvent impacter la liquidité des banques et du système bancaire dans son ensemble si leur système de moyens de paiement ou l'accès aux plateformes de refinancement sont compromis et dans la mesure où une catastrophe non anticipée viendrait détruire ou limiter l'accès à des plateformes de paiement ou de refinancement stratégiques (type SWIFT). Ce risque prend un caractère systémique car l'ensemble du système bancaire peut être impacté par des dysfonctionnements provenant de l'une des banques du système. Pour le prévenir, des plans de continuité doivent être mutualisés à l'échelle du secteur ou encore être pris en charge par une instance de supervision (régulatrice ou non).

3.1.3.2. Les banques sont exposées aux risques climatiques physiques via les contreparties qu'elles financent et donc leur risque de crédit

Dans le cas des risques physiques, les secteurs de l'économie réelle de l'agriculture, l'industrie agroalimentaire et de l'exploitation forestière semblent les plus concernés mais leur poids dans l'exposition des banques est relativement faible (autour de 1 % du portefeuille de crédits accordés par les banques françaises à l'exception des banques spécialisées dans l'accompagnement de l'activité agricole et agraire). Les secteurs liés à la propriété immobilière semblent les plus concernés car ils forment plus d'un quart des crédits accordés aux entreprises par les banques (ACPR, 2017) : l'immobilier (15 % du portefeuille) ; la construction (8 %) et l'hôtellerie et la restauration (2 %). Le cas du secteur de la santé, dont les impacts (pollution de l'air, vagues de chaleur) sont potentiellement très forts, est peu abordé dans ce chapitre car il est concerné par des risques climatiques systématiques et non spécifiques et peut donc difficilement faire l'objet d'une analyse de risque spécifique par établissement.

Les autres acteurs bancaires européens, et *a fortiori* français, sont pour le moment relativement épargnés pour deux raisons principales : (i) de par leurs expositions géographiques concentrées sur le continent européen et la relative faible exposition aux risques de catastrophes naturelles majeures du continent et (ii) grâce à la qualité de la couverture assurantielle sur les actifs qu'ils financent. C'est en particulier le cas en Europe et en France où il existe un marché assurantiel privé important, mais également parce qu'il existe un système assurantiel public fournissant une couverture universelle lors de l'occurrence de catastrophes naturelles. En France, cette couverture supplémentaire est assurée par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) et le Fonds de Prévention

⁷³ Les risques de liquidité peuvent se comprendre de deux façons. Il s'agit à la fois de la liquidité des marchés financiers (au sens des indicateurs surveillés par le Comité de Bâle) mais aussi la liquidité liée à la capacité des banques à fournir un service bancaire quotidien et immédiat.

des Risques Naturels Majeurs (FPRNM) et financée *via* un mécanisme de solidarité géographique de charge supplémentaire imposée à chaque contrat privé.

Ce dernier point est toutefois un postulat à nuancer fortement car le poids du secteur assurantiel dans l'ensemble du secteur financier en fait un acteur prépondérant dont la fragilité ou même le changement de stratégie ou de modèle de revenus impacte la stabilité et l'activité de l'ensemble du secteur financier.

3.1.3.3. Risque physiques de second tour, émanant d'un changement de stratégie des assureurs

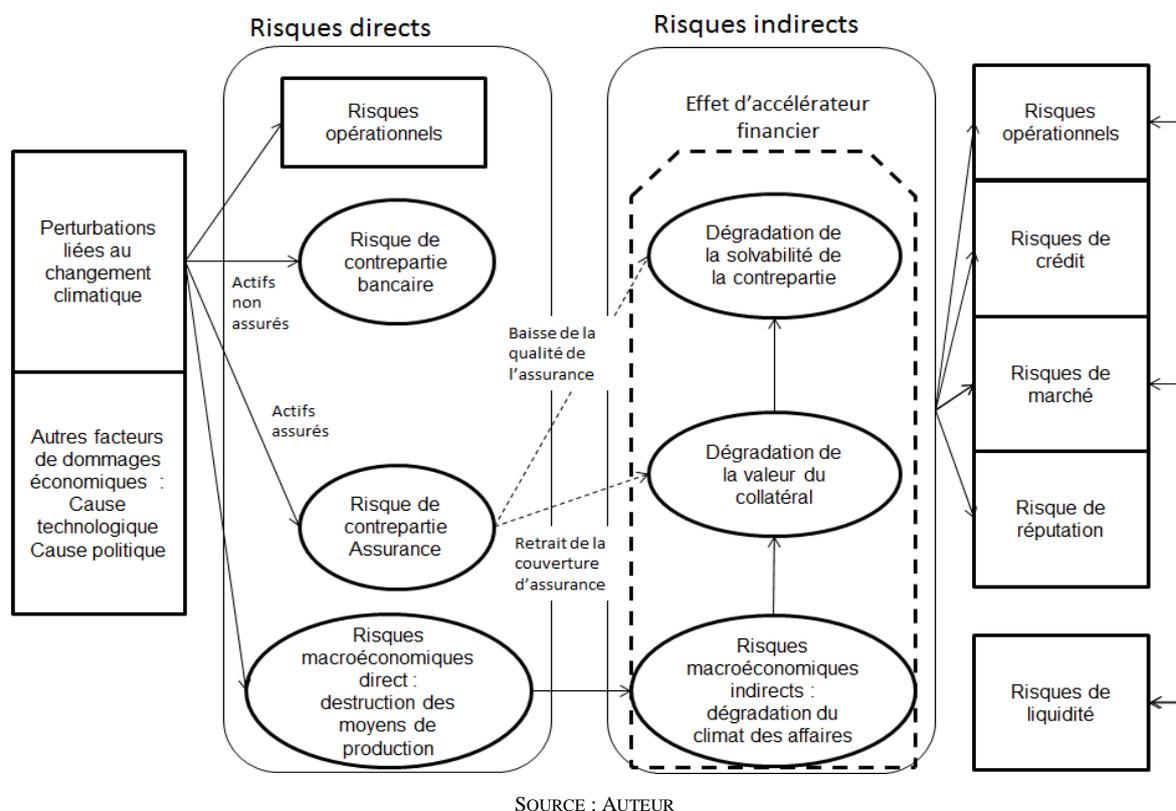
Les expositions directes des banques aux compagnies d'assurances sont infimes par rapport aux autres secteurs (elles représentent, d'après les données de la Banque de France, moins de 2 % des crédits ou des dépôts dans le bilan des banques françaises en 2016. Il s'agit d'avantage d'un risque indirect qui pèse sur les banques via des effets de second tour. Les effets de second tour des risques climatiques correspondent à la propagation du choc initial subi par une entité financière sur le reste du secteur financier (Battiston et al., 2016).

La recrudescence et l'augmentation de l'intensité et des pertes à assurer aux souscripteurs peut ponctionner leur bilan jusqu'à causer leur faillite. L'instabilité d'un acteur aussi important dans le secteur financier est source d'instabilité pour l'ensemble des agents car les assureurs sont des investisseurs majeurs sur le marché de la dette, en particulier obligataire publique mais aussi privée, notamment bancaire (Billio et al., 2012). Le risque de défaut du secteur assurantiel, en particulier dans les économies développées, reste faible et historiquement encore inconnu à ce jour. En revanche, les interactions entre les assurances et les banques vont être au cœur des mécanismes de transmission des risques physiques entre assureurs et banques sur le premier et le second tour (impacts directs et indirects) des risques climatiques (via le périmètre, la qualité de la couverture assurantielle et la valeur du collatéral).

Toutes les pertes liées aux dommages pour catastrophes naturelles ne sont pas prises en charge par le secteur assurantiel. Sur les pertes globales liées aux catastrophes naturelles en 2016 estimées à 175 Mds\$ par Munich-Re, seules 30 % (50 Mds\$) ont fait l'objet de dommages pris en charge par les assureurs. Ce chiffre global cache en outre une forte inégalité : près de 50% des pertes sont assurées sur les continents nord-américain et océanique, 30 % des pertes en Europe, 18 % des pertes en Amérique du Sud, 11 % en Asie et 1 % sur le continent africain (Munich-Re ; 2017 – voir infographie en annexe 8.2).

En effet, les pertes non ou imparfaitement assurées font peser un risque sur le reste du système financier via les pertes enregistrées par leurs contreparties de la sphère économique réelle, autrement dit ménages et entreprises. Le secteur le plus à risque pour les banques est celui des particuliers car il représente plus de la moitié des crédits accordés par les établissements bancaires (données Eurosystem et Banque de France) et plus précisément les crédits immobiliers aux ménages localisés dans des zones à risque (littoral, territoire rural fragile, zone touristique sensible).

FIGURE 24. MECANISMES DE TRANSMISSION DES RISQUES CLIMATIQUES PHYSIQUES



Les banques sont exposées à un risque de crédit de second ordre si les actifs de leurs contreparties souffrent d'un retrait partiel ou total ou encore d'un renchérissement de leur couverture d'assurance (Figure 24). Alors que les compagnies d'assurance sont plus exposées aux risques physiques directs et aux risques fiduciaires, une part significative de risques indirects qui pèse sur la valeur et la résilience des débiteurs et du collatéral vient échouer principalement sur les intermédiaires bancaires notamment par le biais du crédit et des contraintes de liquidité des agents sinistrés. La réduction de la couverture assurantielle fait baisser la valeur du collatéral (valeur adossée au prêt bancaire pour en garantir la solvabilité). Cela crée une pression supplémentaire sur le coût du crédit de manière directe si ce dernier est octroyé en fonction de la valeur du collatéral

(*Loan to Value*, LTV) ou de manière indirecte, par la réduction de la solvabilité des agents, si les actifs sont financés sur des critères de revenus (approche *Loan to Income*, LTI).

Ces risques sont fortement accrus si la couverture assurantielle de ces ménages est faible et la vulnérabilité initiale de l'emprunteur est forte (Von Peter et al., 2012). Une étude de PwC réalisée en 2016 a montré que seule la moitié des pertes (évaluées entre £2 et £2,8 milliards) encourues lors des tempêtes Desmond, Eva et Franck survenues au Royaume-Uni entre décembre 2015 et janvier 2016 était assurées et que la plupart des pertes non couvertes ont échoué aux PME britanniques⁷⁴.

De ce point de vue, il s'agit d'un risque émergent et pas encore présent fondamentalement. Une étude de 2015 de SwissRe⁷⁵ rappelle que l'exposition aux pertes non assurées du patrimoine immobilier en France est très faible (estimée à 0,8 Mds€). De plus, le fonctionnement du financement de l'immobilier en France (LTI vs LTV) permet de contenir les effets de la valeur du patrimoine des ménages sur le risque de crédit. Enfin, la couverture assurantielle publique empêche les actifs vulnérables touchés par une catastrophe naturelle de faire peser un risque de perte de solvabilité trop élevé.

Il est toutefois important de mesurer les effets de glissement et de transfert des risques qui découlent des stratégies et comportements de gestion et de couverture des différents agents : assureurs, réassureurs, ménages, entreprises et banques. Le secteur assurantiel privé est concerné mais également le système assurantiel public, notamment la capacité du FPCNM⁷⁶ à trouver les fonds nécessaires pour assurer des catastrophes naturelles de plus en plus nombreuses et de plus en plus destructrices. Le système assurantiel public est résilient tant que la solidarité géographique est maintenue et couvre suffisamment les dommages pour l'instant localisés.

L'élaboration d'un stress test climatique doit absolument prendre ce phénomène en compte. Or, l'obtention des informations précises (à l'échelle individuelle) sur le périmètre et le prix de la couverture d'assurance est quasiment impossible à l'échelle des banques. Il s'agit d'une information non disponible au niveau agrégé et s'il elle existe, elle est hautement stratégique et détenue par les assureurs. La solution peut émerger par la remontée de ce type d'information directement de la part des contreparties concernées et par l'élaboration de nouvelles normes comptables. Dans une première étape, les réassureurs et la Caisse Centrale de Réassurance (CCR),

⁷⁴ http://pwc.blogs.com/press_room/2015/12/uk-flooding-pwc-updates-insurance-loss-estimates-from-storms-eva-and-desmond-and-comments-on-storm-f.html

⁷⁵ http://media.swissre.com/documents/sigma5_2015_en.pdf

⁷⁶ <http://www.ccomptes.fr/Publications/Publications/Le-fonds-de-prevention-des-risques-naturels-majeurs>

qui est le principal acteur du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, devraient contribuer très fortement et au premier chef à la connaissance de ces risques et à leur diffusion au sein du système financier. Les travaux de recherche des réassureurs Swiss Ré et Munich Ré sont une source de connaissance et d'information utile pour dresser un premier état des lieux de ces effets de second tour.

3.2. Un risque de transition

Le risque de transition est lié à la transition des économies vers une croissance décarbonée, aux dans le respect d'un budget carbone à ne pas dépasser pour respecter la limite du réchauffement climatique tendanciel à moins de 2° par an. Cette transition peut survenir de trois façons : (i) par l'avènement d'un système énergétique de flux, né de la maturation des énergies non carbonées (en général assimilées aux renouvelables) et de l'optimisation des technologies de stockage et d'efficacité énergétique ; (ii) par l'impossibilité pour les énergies de stock d'accéder au marché, de par la mise en place de nouvelles régulations et mesures de soutien (taxes, marchés carbone ou normes de pollution) ; (iii) par l'apparition d'un coût réputationnel et social trop fort qui implique l'arrêt d'activités jugées répréhensibles même si elles restent lucratives de peur de perdre un marché sur d'autres activités⁷⁷.

La transmission des risques de transition au secteur financier découle de quatre grands facteurs, comme identifiés dans les travaux de la TCFD (2016): (i) Les contraintes réglementaires/légales et autres décisions politiques : instauration ou augmentation du prix du carbone, obligations renforcées en matière de *reporting* sur les émissions de GES, régulations sur des produits et services existants, exposition au risque de responsabilité pour non-respect du cadre juridique (*litigation*), décisions/changements d'orientation politique (par exemple, en matière d'incitations fiscales). (ii) Les risques technologiques : substitution de produits et de services existants par des produits et services moins émetteurs qui pourraient engendrer des actifs/investissements « échoués » ou des investissements infructueux dans de nouvelles technologies, des coûts initiaux importants pour réaliser la transition vers des technologies moins émettrices. (iii) Risques de marché: changements dans les habitudes de consommation, incertitude sur les signaux du marché, montée des prix des matières premières. (iv) Risques de réputation: changement dans les préférences du

⁷⁷ Ce type de risque rejoint le troisième type de risque lié aux enjeux climatiques : le risque fiduciaire qui sera explicité dans la section suivante. Il concerne en particulier les énergéticiens engagés dans les ressources carbonées. Les cas des séparations juridiques des activités carbonées et propres des entreprises allemandes E.ON et RWE, ou de la nouvelle stratégie d'ENGIE (ex GDF SUEZ) sont un exemple parlant de ce phénomène de risque de réputation et de sa prise en compte par ces trois grands groupes. Après scission avec E.ON, la filiale « carbonée » Uniper est entrée en bourse en septembre 2016. A l'ouverture de la Bourse de Francfort, le titre Uniper a atteint 10,015 euros, valorisant ainsi la société à près de 3,7 milliards d'euros, soit bien en-deçà de sa valorisation inscrite au bilan comptable d'E.ON (12 milliards d'euros). L'énergéticien allemand RWE, concurrent direct d'E.ON, use de la même stratégie de scission mais pour faire entrer en bourse une filiale dédiée aux renouvelables Innogy en octobre 2016.

consommateur, stigmatisation de certains secteurs, augmentation des inquiétudes des parties prenantes ou mauvais retours des parties prenantes.

Le risque de transition traduit finalement la concrétisation de l'hypothèse de « Peak Demand ». Le marché mondial des énergies carbonées est exposé au risque de réduction de sa demande qui serait soit réduite par des effets de productivité des systèmes, soit reportée sur un marché alternatif. Nous avons à disposition l'expérience récente des impacts en termes de prix que peut avoir une modification, même minime, des fondamentaux de marché : une hausse de 4% du volume de production, combinée à la stagnation de la demande a vu les prix du pétrole chuter de 70% entre 2015 et 2016. Du point de vue de la transmission de ces risques au secteur financier, le canal direct lié à la dépréciation de marché des actifs trop carbonés est un facteur important pour les risques de marché liés aux investissements de portefeuille. Le canal indirect de la dette est également un canal important car les risques de transition indirects touchent les actifs des contreparties financées par les banques, ce qui amène à réévaluer le risque bancaire lié au crédit si les ménages, entreprises ou collectivités n'ont pas anticipé eux-mêmes ces risques de transition.

3.2.1. Les risques de transition portés par les actifs émetteurs de CO₂

Le respect d'un budget mondial de carbone fait émerger la notion d'« actifs échoués » ou rendus inexploitable (« *stranded assets* ») provenant de l'idée que si des engagements concrets sont pris pour limiter le réchauffement et donc respecter la limite du budget carbone, alors une partie très substantielle des réserves prouvées et exploitables d'énergies fossiles devra rester inexploitée. Cette question d'un « carbone non brûlable » (ou « *Unburnable Carbon* ») fait l'objet de travaux récents (Allen et al., 2009 ; Meinshausen et al., 2009 ; Carbon Tracker, 2013 ; Leaton et al., 2013 ; McGlade et Ekins, 2015 ; Spedding et al., 2013) et dont la prise en compte par les acteurs peut amorcer la révélation puis la correction brutale d'une survalorisation des actifs des industries concernées et donc l'éclatement d'une « bulle carbone » (ou « *Carbon Bubble* » ; Griffin et al., 2015). La question « actifs échoués » concerne donc très directement les filières hautement émettrices de CO₂. L'agriculture et l'exploitation forestière représentent 25% des émissions de GES au niveau mondial⁷⁸. De par leur poids dans le PIB mondial, ce sont particulièrement les industries extractives, productrices ou transformatrices d'énergies fossiles carbonées: pétrole, gaz et charbon, qui vont être au centre de l'attention. Comme mentionné dans l'introduction générale, le potentiel carbone de l'ensemble des réserves en énergies fossiles est de 2 860 gigatonnes de CO₂ (AIE WEO, 2015). De ce potentiel, moins d'un tiers peut être exploité si l'on veut respecter le budget carbone imposé par la contrainte des 2°C (McGlade et Ekins 2015). La question de la

⁷⁸ Ces secteurs pourraient même être considérés dans la section suivant car ils sont émetteurs de GES autant qu'ils en sont dépendants.

valeur des réserves en énergies fossiles concerne la sphère privée mais aussi et surtout la sphère étatique. Les compagnies de pétroles et gaz multinationales⁷⁹ représentent une capitalisation globale de 5 000 Mds\$ mais elles ne représentent que 9 % des réserves mondiales et moins de 15% de la production (Hache, 2016). La majorité de l'industrie fossile est contrôlée par états et des compagnies publiques⁸⁰ et plus de 71% des réserves mondiales de pétrole (40% de la production) sont localisées dans les pays de l'OPEP. A l'exception de pays comme les Etats-Unis, le Canada ou la Norvège, les principaux pays riches en ressources fossiles tirent la majeure partie de leurs recettes budgétaires de l'exploitation des énergies fossiles et leur capacité à emprunter sur les marchés financiers est conditionnée par la santé de cette industrie.

Si le marché énergétique devient plus vertueux et qu'il s'oriente vers l'utilisation de ressources décarbonées et la rationalisation de la demande mondiale, notamment par la maximisation des gains d'efficacité énergétique, l'industrie des énergies fossiles est impactée par la chute de la valeur son stock d'actifs et sur ses flux de revenus. La valeur de marché des industriels de l'énergie fossile et parallèlement la valeur et la solidité accordée à la dette émise par les états pétroliers, est indexée sur le niveau de ses réserves prouvées. Si le concept d'actifs échoués s'applique, une part significative de cette valeur est d'un seul coup tronquée, à commencer par celle des réserves dites « frontières », marginales en termes de rendements et de coûts et dont le coût caché en carbone est élevé (exploitation des sables bitumineux canadiens, et des pétroles lourds du Venezuela). L'industrie pétrolière pourrait perdre à elle seule 28 000 milliards de dollars de revenus cumulés des ventes sur ces 20 prochaines années (Lewis et al., 2014). En termes de revenus, cela se traduit par des pertes liées à la chute des ventes de matière première fossile de l'ordre de 22% sur la période.

Les activités liées à l'extraction et la combustion de charbon, l'industrie charbonnière étant réputée être la plus polluante et la plus coûteuse en carbone, sont d'ores et déjà limitées et restreintes dans plusieurs pays depuis plusieurs dizaines d'années de par la mise en place de normes d'émission (*Clean Air Act* aux Etats-Unis dès 1970) ou le marché de quotas carbone (marché EU-ETS en Europe en 2005) et ce, malgré un coût économique faible. Malgré cette identification historique qui suggère une accoutumance à ce statut, elle souffre aujourd'hui encore plus nettement de cette récente notion d'actifs échoués. Les 5 plus grandes entreprises cotées du secteur ont enregistré une

⁷⁹ Les Majors : Exxon Mobil, Shell, BP, Total, Chevron, Conoco

⁸⁰ Les plus connues : Saudi Aramco (Arabie Saoudite), Nioc (Iran), Cnpc (Chine), PDVSA (Venezuela), Petrobras (Brésil), Petronas (Indonésie) Sonatrach (Algérie), Statoil (Norvège), Gazprom (Russie).

importante décote boursière au cours des cinq dernières années⁸¹, et la chute du géant charbonnier américain Peabody montre que les marchés sont capables des ajustements à faire en termes de révision de la valorisation des actifs carbonés. Les déboires de la filière du charbon illustrent les conséquences sur la valorisation de ses actifs, d'un délaissement de marché qui commence à prendre en compte les risques climatiques de transition qu'encours la filière d'extraction et de production d'énergies fossiles dans leur ensemble.

3.2.2. Les risques de transition portés par les actifs qui dépendent du CO₂

Les actifs des secteurs non énergétiques mais fortement dépendants des énergies fossiles sont également concernés par des risques de transition dans la mesure où ils se trouvent privés de leur matière première carbonée dans le cas où ils n'anticipent pas suffisamment la substitution de celle-ci par une matière première non carbonée ou des gains d'efficacité.

Une transition énergétique bas-carbone mal anticipée par les acteurs économiques et financiers peut conduire à un impact macroéconomique fort car elle affecte tant l'offre que la demande de par une réduction drastique de l'offre de facteurs de production énergétique. Si ces facteurs ne sont pas assez rapidement remplacés par des équivalents décarbonés (ou alors à des coûts très élevés du fait d'un manque de progrès technique et technologique), cela entraîne un stress sur le volume et les prix de l'énergie. Ce risque est présent, tant pour le secteur de la génération d'électricité (responsable de 57 % des émissions de GES dans le cas de l'Europe) que pour les autres secteurs productifs utilisant des facteurs de production intensifs en GES comme le transport (22 % des émissions), l'industrie manufacturière (8 %), l'agriculture (10 %) et la gestion des déchets (3 % ; données Eurostat). En France, les secteurs du transport, de l'immobilier (résidentiel et tertiaire), de la chimie, des matériaux, et de la construction sont les secteurs les plus représentatifs (Table 24). Les chocs macroéconomiques sont d'autant plus forts que ces secteurs occupent une place importante dans le PIB, 10% pour l'industrie manufacturière, 5% pour la construction, 16% pour le transport et le commerce et enfin 11,5% pour l'immobilier (Table 25). La contribution au PIB et plus important encore, celle en emploi⁸² induit inversement une forte tentation à réprover et adoucir les contraintes non économiques pesant sur ces industries et limitent de ce fait leur capacité de résistance à la mise en place soudaine de telles contraintes.

⁸¹ Voir notamment l'interview de Myriam Durand, directrice de Moody's France : <http://www.usinenouvelle.com/editorial/nous-avons-deja-degrade-une-note-sur-un-risque-environnemental-temoigne-la-directrice-de-moody-s-france.N367343>

⁸² Selon les chiffres du ministère de l'industrie et de l'énergie, les secteurs les plus exposés comme la chimie, la production d'énergie secondaire ou le transport emploient collectivement plus de 10% de la masse salariale nationale

TABLE 24. EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE PAR SECTEURS (APPROCHE PAR L'UTILISATEUR FINAL)

	Millions de tonnes équivalent CO2	Contribution du secteur
Combustion de combustibles dans les transports	131,0	41,5%
<i>Combustion de combustibles dans l'aviation civile</i>	4,6	1,4%
<i>Combustion de combustibles dans les transports routiers</i>	124,2	39,3%
Autres secteurs de la combustion de combustibles	85,3	27,0%
<i>Combustion de combustibles dans le secteur commercial et institutionnel</i>	24,1	7,6%
<i>Combustion de combustibles par les ménages</i>	48,6	15,4%
<i>Combustion de combustibles dans l'agriculture, la sylviculture et la pêche</i>	12,7	4,0%
Combustion de combustibles dans les industries manufacturières et de la construction	60,0	19,0%
Combustion de combustibles dans la sidérurgie	15,2	4,8%
Combustion de combustibles dans la fabrication de métaux non ferreux	0,8	0,2%
Combustion de combustibles dans la fabrication de produits chimiques	17,0	5,4%
Combustion de combustibles dans la fabrication de pulpe, papier et impression	2,7	0,9%
Combustion de combustibles dans la fabrication de produits alimentaires, de boissons et de tabac	7,0	2,2%
Combustion de combustibles dans la fabrication de produits minéraux non métalliques	8,9	2,8%
Combustion de combustibles dans les autres industries manufacturières et de la construction	8,3	2,6%
Combustion de combustibles dans les industries de l'énergie	39,4	12,5%
<i>Combustion de combustibles dans la production d'électricité et de chauffage publics</i>	28,2	8,9%
<i>Combustion de combustibles dans le raffinage du pétrole</i>	7,9	2,5%
<i>Combustion de combustibles dans la fabrication de combustibles solides et autres industries de l'énergie</i>	3,3	1,0%

SOURCES : DONNEES FRANCE EUROSTAT

TABLE 25. POIDS DES SECTEURS DANS LE PIB

	Valeur Ajoutée brute (prix courants M€)	Part dans le PIB
Total - ensemble des activités NACE	1 919 104,0	89,6%
Agriculture, sylviculture et pêche	33 202,0	1,6%
Industrie (sauf construction)	264 551,0	12,4%
Industrie manufacturière	214 000,0	9,9%
Construction	111 093,0	5,1%
Commerce, transport, hébergement et activités de restauration	336 401,0	15,9%
Information et communication	93 068,0	4,3%

Activités financières et d'assurance	87 611,0	4,1%
Activités immobilières	246 312,0	11,5%
Activités spécialisées, scientifiques et techniques; activités de services administratifs et de soutien	245 122,0	11,4%
Administration publique, défense, éducation, santé humaine et action sociale	443 552,0	20,7%
Arts, spectacles et activités récréatives; autres activités de services; activités des ménages et extraterritoriales	58 193,0	2,7%

SOURCES : DONNEES FRANCE EUROSTAT

3.2.3. Impacts financiers des risques de transition sur le secteur bancaire

Le secteur bancaire est exposé aux risques de transition au travers de l'exposition de son bilan aux secteurs qui sont soit émetteurs de GES, soit à ceux qui leur sont dépendants. Ces risques se décomposent en deux grandes parties, une partie investissement (portefeuille de titres) et une partie financement (crédits accordés aux entreprises, ménages et collectivités locales).

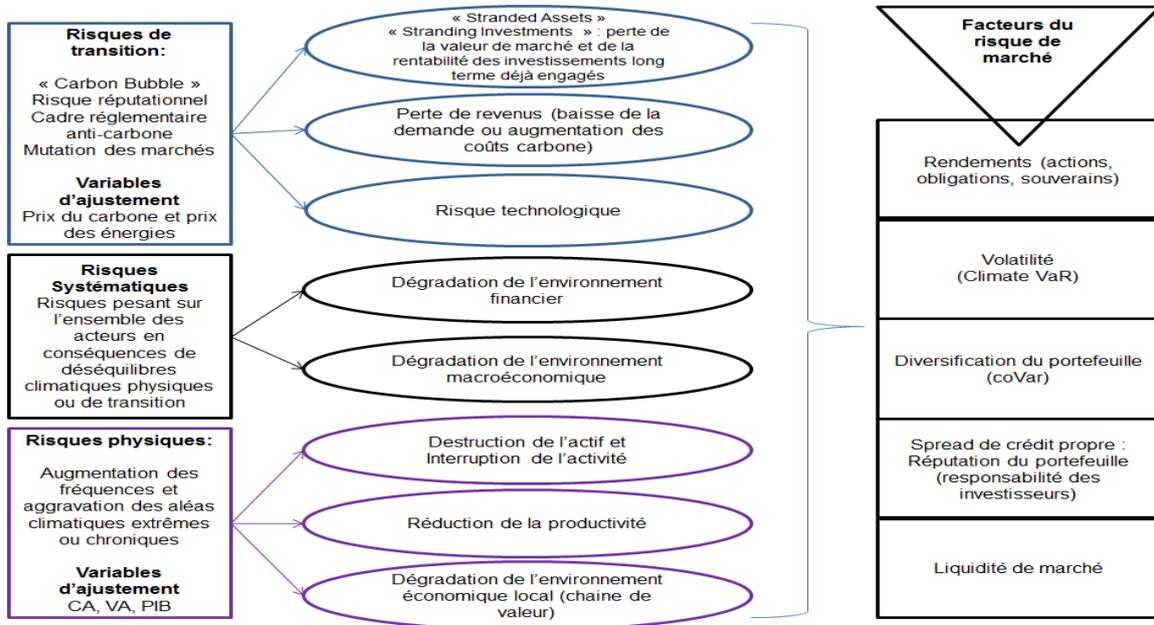
3.2.3.1. Risques de transition et risques de marché

Les risques de marché sont impactés par un risque de transition (effet sur les rendements, la volatilité et le spread de crédit des actifs sensibles aux prix du carbone et de l'énergie) (Figure 25). Il est également possible que les risques de transition impactent l'évaluation des risques de marché par un canal de transmission non-financier : un risque de réputation mesuré sous l'angle du spread de crédit pour compte propre. Autrement dit la capacité de la banque à proposer un portefeuille satisfaisant d'un point de vue de l'exposition aux risques climatiques, en particulier les risques de transition peut avoir un impact sur l'attractivité des titres de dettes émis en propre.

Un changement mal anticipé, tardif (rupture de la tendance *business as usual* déclenchée suite à une catastrophe climatique grave et généralisée) et donc brutal des usages énergétiques mondiaux causerait un stress conséquent et une dévalorisation de l'actif de ces firmes de l'industrie fossile de l'ordre de 50 % du fait d'une baisse de leur valeur de marché ou de leurs revenus d'activité (HSBC, 2013). L'industrie des énergies fossiles pèse lourd dans l'économie mondiale et elle est, de plus, fortement endettée. Si les banques américaines sont engagées au niveau local et ont souffert de la volatilité et de la cyclicité des prix du pétrole, les institutions financières européennes sont également exposées à moyen long terme à hauteur de 1 000 Mds \$ que ce soit en détention de capital dans les industries fossiles (40 %) ou au travers du marché de la dette (60 %). Les banques représentent 45 % de ces institutions, les assureurs 32 % et les fonds 23% (Weyzig et al., 2014). Toutefois, les expositions à l'industrie fossile ne représentent qu'une petite

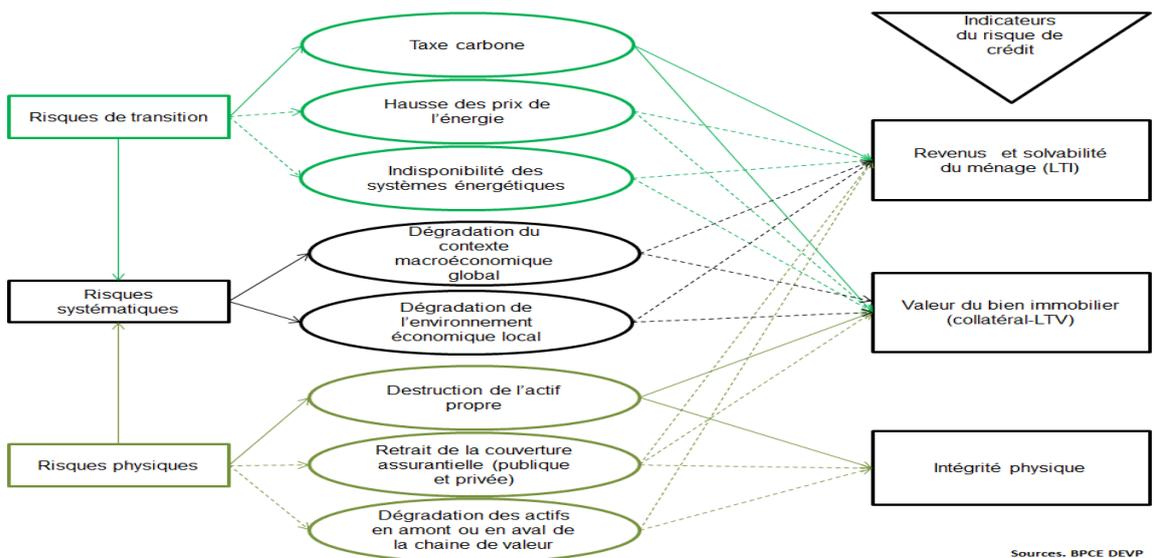
part des actifs des banques européennes (1,4 % contre 4 % et 5 % pour les assureurs et fonds de pension).

FIGURE 25. SCHEMA DE TRANSMISSION DES RISQUES CLIMATIQUES DE TRANSITION AUX RISQUES DE MARCHE



SOURCE : AUTEUR

FIGURE 26. CANAUX DE TRANSMISSION DES RISQUES CLIMATIQUES AUX RISQUES DE CREDIT



Sources. BPCE DEVP

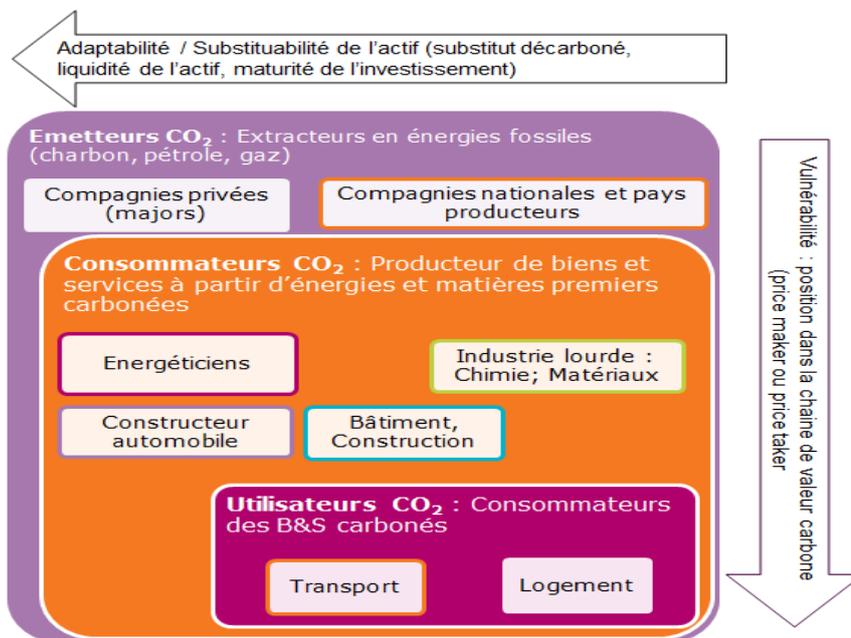
SOURCE : AUTEUR

3.2.3.2. Risque de transition et risque de crédit

Le secteur financier peut souffrir de la dévaluation des actifs carbonés et jugés inexploitable ou obsolètes dans une trajectoire bas-carbone dans la mesure où il continue de les financer. Les risques de transition impactent donc également l'exposition des institutions financière via leur risque de crédit (Figure 26). Les banques sont exposées aux risques climatiques principalement via leurs contreparties les plus intermédiés (ayant recours majoritairement au crédit bancaire pour se financer): ménages et PME.

Les risques de transition affectent le risque de crédit bancaire lorsque les actifs des ménages et des entreprises sont dépendants, non-cessibles et non liquides (Figure 27). Ces derniers sont dits vulnérables aux risques climatiques du fait de leur localisation géographique, leur positionnement sectoriel (selon une nomenclature fine) et l'adaptabilité (ou substituabilité) de leurs actifs à moyen terme. L'accent est mis ici sur le caractère substituable (résilient) du stock d'actifs existant (parc automobile, immobilier, productif) et de la corrélation qu'il existe potentiellement entre cette substituabilité et la vulnérabilité de ces acteurs.

FIGURE 27. RISQUES DE TRANSITION ET VULNERABILITE DES SECTEURS ET ACTEURS EXPOSES



SOURCE : AUTEUR

Un exemple parlant et une part importante du risque de transition pour les banques est le secteur du logement en France, étudié sous l'angle énergétique et microéconomique dans les deux

premiers chapitres de cette thèse. Le logement représente près de 70% de la richesse patrimoniale des ménages français (Arrondel et al. 2014). Nous avons vu qu'une grande majorité des logements résidentiels en France ont une performance énergétique faible, plus de deux tiers des logements du parc métropolitain sont labellisés D et près de 13 millions de logements sont très énergivores⁸³. La mise en place d'une politique énergétique bas-carbone contraignante peut faire peser un risque non négligeable sur ces ménages. L'implémentation d'une taxe carbone, ou une obligation massive de mise aux normes et de travaux de rénovation coûteux impacte la solvabilité des ménages. Les plus vulnérables peuvent souffrir d'une explosion de leur facture énergétique ou encore d'une chute de la valeur de leur logement elle-même. Nous avons vu au chapitre 2 que les logements non performants peuvent subir une décote de marché jusqu'à 13%. Le premier chapitre nous a également appris que ce sont les ménages les plus vulnérables en termes de revenus qui sont le plus susceptibles d'être les premiers impactés par une hausse des prix de l'énergie car ils expriment plus souvent un plus grand besoin de confort énergétique (familles nombreuses, monoparentales et personnes âgées), d'autant plus qu'ils habitent les logements les plus vétustes et âgés, et donc les moins performants. Le risque de transition apparaît d'avantage pour les banques comme un risque de crédit associé aux agents les plus vulnérables, incapables de substituer leurs actifs à moindre coût. Le transfert de risque vers les banques, du fait de ce biais de vulnérabilité est un enjeu très important pour le secteur financier et économique, il doit faire l'objet de recherches empiriques plus approfondies.

3.3. Un risque légal ou fiduciaire

Il s'agit du troisième et dernier type de risque évoqué par Carney (2015) dans son discours sur l'impact du changement climatique sur le monde de la finance. Selon le président du *Financial Stability Board* (FSB), il recouvre les enjeux et les défis les plus importants pour les acteurs en place. Ces risques émanent de la responsabilité légale des institutions financières d'utiliser au mieux (obligation de diligence) la totalité de leur connaissance des risques et des opportunités de marché à court, moyen et long termes (aussi longtemps que les investisseurs leur attribuent leur confiance et leur épargne financière). Leur responsabilité peut être engagée à la fois sur le passif et l'actif de leur bilan et leur activité d'investisseur dans le cas où elle failli à trois types d'obligations (PRA, 2015) :

(i) Atténuer : une action en justice peut être menée sur la responsabilité directe du système financier face au changement climatique de par ses émissions directes en carbone (empreinte

⁸³ Efficacité énergétique retranscrite par une étiquette F ou G, chiffres issus de l'enquête PHEBUS réalisée en 2013

carbone liée au fonctionnement de l'industrie financière) ou plus pertinemment de par ses émissions indirectes (contenance en carbone de son portefeuille d'actifs). Ce type de responsabilité est plus difficile à concevoir dans sa réalisation concrète car cela relève de l'action collective de l'établissement d'une « obligation de diligence » envers non seulement les personnes privées (souscripteurs ou clients) mais aussi l'ensemble de la société civile et de l'apport de preuve d'un lien de causalité direct entre le réchauffement climatique et l'activité d'une (ou même d'un groupe) institution particulière.

(ii) S'adapter : les institutions financières peuvent être la cible d'actions en justice si elles ne prennent pas suffisamment la mesure des risques climatiques dans leur décision et leurs investissements (pouvant être apparenté à un acte d'omission voire de négligence). Ce type d'action peut à la fois être mené sur leur passif (protection de biens pour les assureurs et des moyens de paiement pour les banques) mais également sur leurs activités d'investissement (elles seraient responsables des pertes en capital associées à l'éclatement d'une bulle carbone mal anticipée) et de financement (dégradation de la valeur des biens financés par intermédiation et de la valeur du collatéral).

(iii) Être transparent sur son rôle dans la conduite des objectifs climatiques. Les recours peuvent également se baser sur le fait que le système financier n'a pas fourni d'informations suffisantes au marché et aux investisseurs pour qu'ils prennent la mesure de leurs expositions aux risques climatiques. Ce troisième point est probablement l'un des plus importants car il peut traduire des évolutions dans la législation et la réglementation financière et a un impact potentiel fort à très court terme. Le risque de pertes associées au versement de dommages est plus faible que le précédent point mais ce type de recours va provenir plus vraisemblablement de la part des autorités de régulation du secteur financier et se traduire par une obligation de transparence accrue et un travail de compliance important et coûteux pour les institutions qui n'ont pas encore pris en main ces enjeux. La législation évolue très vite avec les premiers pas effectués en France (Article 173 de la LTECV) et par les travaux de la TCFD (*Task force on Climate related Financial Disclosures*).

Le coût réel de ces risques est difficile à déterminer, du fait de la longueur et du caractère aléatoire des actions en justice, et son anticipation est tout autant difficile à intégrer dans les arbitrages financiers que la constitution de provisions pour risques et pertes sur dommages et intérêts (près de 40% du montant total provisionné en 2014 chez les assureurs (PRA, 2015)). Pour autant, la jurisprudence a montré que ce type de risque était bien plus coûteux que ceux engendrés par des risques physiques pour les acteurs (notamment si l'on prend l'exemple de l'affaire de l'amiante

aux Etats-Unis qui a engendré le versement de dommages et intérêts de la part des compagnies d'assurance de 85 Mds\$ (AM Best, 2013), soit un montant 4 fois plus élevé que le montant versé au titre des pertes encourues lors de l'ouragan Sandy en 2012). Le consensus scientifique adoubé par un accord politique mondial sur les effets d'un changement climatique, couplé à des mesures de régulation sur l'obligation de transparence sur l'exposition et l'impact des activités financières aux enjeux climatiques appellent les institutions financières à considérer les risques climatiques fiduciaires avec le plus grand intérêt. L'information et la transparence sur l'alignement réel des activités du secteur avec les enjeux climatiques offrent la possibilité pour les investisseurs de choisir s'ils souhaitent ou non se couvrir contre les risques climatiques. Elle permet aussi d'alimenter des recherches de responsabilité juridique et fiduciaire en matière environnementale.

3.4. Les risques climatiques sont-ils source de risque systémique ?

Le climat peut-il menacer la stabilité financière? Oui si les institutions financières sont incapables de s'en couvrir efficacement. Lorsqu'un risque ne parvient pas à être internalisé par les agents d'un marché mais met en péril l'ensemble du système du fait de la fragilité d'un ou plusieurs acteurs, on le qualifie de risque systémique. C'est alors au régulateur de proposer des solutions, garde-fous ou incitations pour internaliser ce type de risque dans l'arbitrage financier collectif.

Il apparaît dans des travaux récents sur le sujet que près de 50% de ces risques ne sont pas diversifiables par des stratégies individuelles (CISL, « *Unhedgeable Risks* », 2016). Les stratégies individuelles de diversification vers d'autres marchés ou d'autres classes d'actifs ne permettent pas de se couvrir de l'intégralité des risques climatiques car ces derniers sont, d'une part liés à un contexte d'incertitude qui ne permet pas de les appréhender parfaitement, et d'autre part ces risques sont corrélés entre eux et leur mécanismes de transmission sont complexes et font intervenir des agents économiques si importants qu'ils revêtent un caractère systématique plutôt qu'idiosyncratique.

3.4.1. Définition

On parle d'un risque systémique lorsque la fragilité d'un système est révélée par l'incapacité des individus qui le compose d'intégrer, dans leurs stratégies individuelles, un facteur de risque pour le marché. Ce dernier est un risque qui contient une dimension endogène et structurelle qui émerge de trois grandes externalités (De Nicolo et al, 2012) : une complémentarité stratégique (risque lié à la prise de position commune d'un grand nombre d'acteur) ; des externalités liées aux actions

collectives des faiseurs de marché (liquidation des positions au même moment) et des externalités liées aux interconnexions entre institutions financières (effet de réseau financier).

Dans la littérature consacrée aux risques systémiques, on dénombre quatre comportements facteurs de risque (Benoit et al, 2015) :

- Les investissements corrélés : les institutions financières s'exposent au même risque si elles investissent toutes dans le même type d'actifs du fait d'un comportement moutonnier jugé plus ou moins stratégique (éviter de subir la malédiction du survivant ou profiter d'un sauvetage collectif en cas de choc sur l'industrie).
- Le risque de liquidité : Si les banques investissent trop dans des actifs peu liquides, elles exposent le système à un risque agrégé de pénurie.
- Les risques d'évènement rare dit de « queue de distribution » (ou *tail risks*) : les chocs sont d'autant susceptibles de toucher l'ensemble du système qu'ils entraînent des pertes généralisées importantes. Alors que l'investisseur mais également le régulateur est globalement myope face à ces risques, ils se substituent aux risques « normaux » au sein des bilans et se développent fortement dans le système bancaire parallèle (Gennaioli, Schleifer, et Vishny, 2013).
- Les cycles d'endettement et les phénomènes de bulle : il existe une corrélation positive entre les cycles d'endettement et les cycles économiques. Parce que les volumes empruntés sont contraints par la valeur du collatéral apporté, les agents non-financiers tendent à d'avantage s'endetter lorsque la valeur de leur collatéral est élevée comme en phase d'expansion d'un cycle économique. Le caractère pro cyclique du crédit est un facteur de risque systémique car il favorise à la fois une surexposition aux risques en phase de boom et un mécanisme d'amplification en phase de récession. En effet, lorsque le cycle économique entre en phase de contraction, les agents se désendettent, faisant éclater la bulle des actifs puis une chaîne de défauts provoquant un rationnement généralisé comme observé en 2008 lors de la crise des *subprimes* (Borio, 2012).

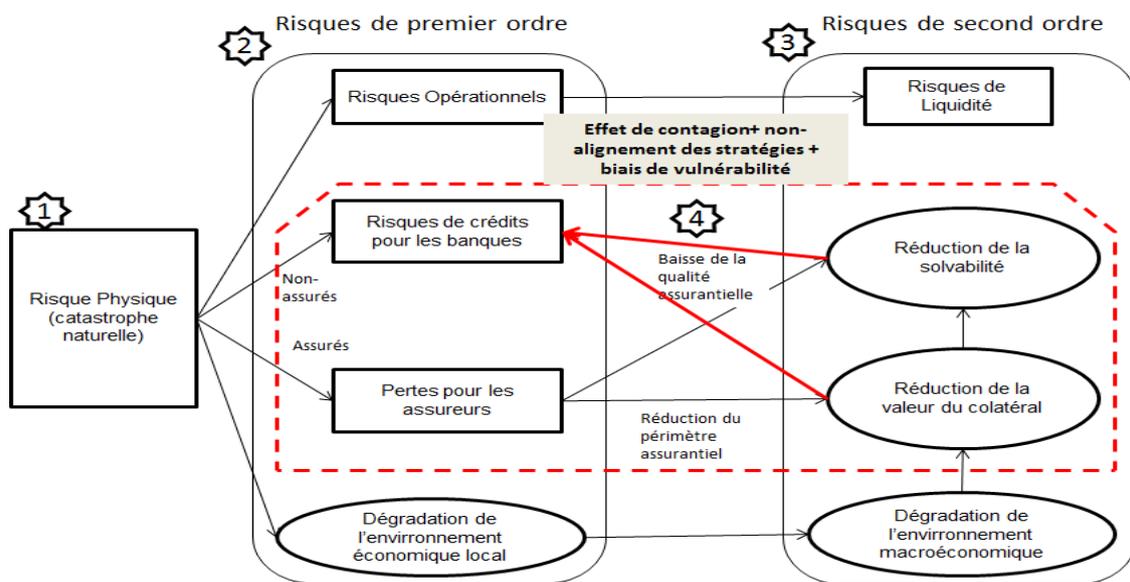
A ce jour, la valorisation du risque systémique est un exercice complexe et évolutif qui appelle à une grande prudence car sa valorisation et sa sensibilité dépend encore grandement de la méthode et du type d'information utilisées selon qu'elles sont publiques, privées, historiques (VaR) ou scénarisées et analysées en tests de résilience (Benoit *et al.*, 2016). Mais l'on voit la potentialité systémique des risques climatiques qu'ils soient physiques ou de transition, directs ou indirects.

3.4.2. Application au contexte climatique

Les institutions financières ne sont pas exposées de la même manière aux risques climatiques. Cette asymétrie peut créer un mauvais alignement des intentions (dans ce cas des stratégies de couverture), des phénomènes d'accélérateur financier, et un biais de vulnérabilité (qui fait porter plus de risques aux banques qu'aux marchés) qui peuvent chacun générer des facteurs de risques systémiques.

Premièrement, nous avons vu qu'en ce qui concerne la transmission des risques climatiques physiques (section 3.1.3), il existe une asymétrie d'exposition aux risques climatiques physiques entre les assureurs et les banques. Comme illustré sur la Figure 28, les assureurs vont davantage pâtir d'un risque physique direct et les banques sont plus exposées aux risques physiques indirects ou de second tour. Il existe une source de risque systémique qui émane des interconnexions entre banques et assurances dans le secteur du logement en particulier.

FIGURE 28. RISQUES CLIMATIQUE SYSTEMIQUE : RISQUES PHYSIQUES ET EFFETS DE SECOND TOUR



SOURCE : AUTEUR

Selon Brunnermeier et al. (2009) et Shiller (2016), le marché du logement est une classe d'actif prône à être le berceau des crises financières car il s'agit d'un actif très peu liquide intensif en capital qui est en majeure partie financé par la dette et qui enfin, représente une part importante de l'économie réelle. Nous allons voir que c'est un secteur qui cumule à la fois des risques systémiques financiers et climatiques. Dans le secteur immobilier, la survenance de perturbations climatiques (inondations, tempêtes...) de plus en plus nombreux et de plus en plus extrêmes vont

impacter le taux de couverture ou même le prix de leur couverture d'assurance. En effet, le marché assurantiel européen est basé sur un système de contrat annuel qui lui permet de faire répercuter directement la réévaluation des risques climatiques sur le montant des primes d'assurance des actifs à risque. Les actifs de moins en moins couverts voient leur valeur diminuer et la valeur du collatéral utilisée comme garantie auprès des banques va diminuer tout autant. La stratégie d'adaptation aux risques physiques climatiques des assureurs va donc indirectement augmenter l'exposition des banques à ce même type de risques de par la diminution de la couverture assurantielle, ou le renchérissement de celle-ci provoquant une baisse de valeur du collatéral et donc de la garantie bancaire.

Deuxièmement, les risques de transition indirects sont également sources de risque systémique lorsqu'ils s'engagent dans des dynamiques d'accélérateurs financiers causés par des phénomènes de ventes d'actifs forcés par la dégradation du collatéral servant à assurer une dette. Le mécanisme, mis en lumière par Kiyotaki et Moore (1997) est le suivant : lors d'un choc même marginal (dans ce cas si une compagnie d'assurance décide de cesser d'assurer un ensemble de biens immobiliers jugés trop à risque), la valeur en capital de ces biens diminue et les entreprises et ménages qui utilisent ce bien pour souscrire de la dette auprès de leur banque, voient leur collatéral diminuer d'autant. Leur capacité d'endettement réduite les pousse à céder une partie de ce capital pour satisfaire les nouvelles exigences de collatéral, causant une dévaluation supplémentaire et nourrissant l'accélérateur financier.

Enfin, les mécanismes de contagion et de cycle sont amplifiés par un biais de vulnérabilité créant un accélérateur du transfert du risque des marchés financiers vers les marchés intermédiés. En effet, ce sont les acteurs les plus fragiles en termes de vulnérabilité et ceux dont la valeur du patrimoine immobilier est la plus faible qui vont sortir en premier du giron assurantiel privé et faire porter le risque climatique physique ou de transition à des organismes de solidarité publics ou aux banques qui financent encore les actifs.

4. Comment mesurer une exposition aux risques climatiques ?

La question de la mesure du risque est de la plus grande importance car cela conditionne la capacité des acteurs à appréhender l'incertitude liée aux enjeux climatiques et à la transformer en risque selon la définition donnée par Knight (1921). La différence entre incertitude et risque tient de la possibilité de probabiliser (et donc de s'assurer) un futur aléatoire dont les rendements (ou les pertes) attendus sont à première vue inconnus. D'après Knight, ces réalisations espérées peuvent être catégorisés selon trois types : les premiers suivent une loi de probabilité mathématique connue

et observée (soit la probabilité de tomber sur pile lorsque l'on lance une pièce) ; les seconds obéissent à une loi de probabilité non observable mais que l'on peut approcher asymptotiquement en utilisant la loi des grands nombres (la probabilité qu'une maison prenne feu se rapproche de la distribution historique des incendies ayant lieu dans les mêmes circonstances même si l'ensemble des facteurs responsables de cet incendie sont inconnus) ; et enfin les derniers suivent une loi de probabilité non observable et pour lesquels il est impossible d'approximer une distribution en utilisant des informations et données historiques. Alors que les deux premiers types de rendements incertains peuvent être considérés comme risqués et donc être assurés, le troisième en revanche reste du domaine de l'incertain et ne peut pas être valorisé par un prix du risque.

La nature même des risques climatiques⁸⁴ ne permet pas de se contenter d'utiliser les données historiques car elles ne comportent pas (encore) d'événements à la hauteur de ceux qui peuvent survenir dans un futur plus ou moins proche. Il en va de même pour l'évaluation des risques de transition et fiduciaires qui souffrent du même problème : les chocs (positifs ou négatifs) liés aux enjeux climatiques n'ont pas encore eu lieu. Ce constat ne doit pas pour autant laisser la place à une apathie qui serait tout aussi irrationnelle mais il impose aux institutions financières, dont la prérogative est justement d'évaluer les risques, de changer la manière dont elles évaluent leur exposition climatique. Pour mesurer son exposition et sa résilience aux risques climatiques, le système financier doit utiliser l'ensemble des connaissances qu'il a à disposition, mais il convient d'éviter de se contenter des méthodes traditionnelles d'évaluation des risques et de rentrer dans l'impasse d'une stratégie du rétroviseur (« *rearview mirror* ») de par l'utilisation exclusive de telles méthodes (par l'approximation d'une probabilité par son occurrence historique).

Les institutions financières doivent en premier lieu établir une connaissance de leur exposition aux impacts d'un changement climatique ou d'une transition énergétique bas-carbone. Pour ce faire, elles peuvent soit tenter d'évaluer le risque de pertes en portefeuille à l'aide d'outils de finances connus et adaptés aux enjeux climatique comme la mesure d'une « *Value at Risk* » climatique ; soit établir la mesure d'une empreinte carbone, qui selon les niveaux qu'elle prend et les indicateurs utilisés, intègre plus ou moins l'ensemble du bilan des acteurs financiers.

La seconde étape est alors de mesurer la résistance des bilans et des expositions à un choc climatique qu'il soit physique ou de transition. Deux approches sont possibles, une approche macroéconomique dite « *top down* » qui mesure l'adéquation des activités financières à un budget

⁸⁴ Nous avons vu que les risques climatiques sont fortement corrélés entre eux et que les outils de mesure basés sur des données historiques sont insuffisants pour évaluer de manière rigoureuse les pertes potentielles associées aux concepts de « *tail risks* » et de « *tipping points* ».

carbone défini et fixé au niveau agrégé, ou une approche « *Bottom Up* » qui établit un impact « ligne à ligne » des activités financières et détermine leur degré d'exposition agrégé ex-post.

4.1. Approches d'intégration par le haut ou par le bas :

Comme mentionné ci-dessus, afin d'évaluer la compatibilité d'un investissement ou d'un portefeuille d'actifs avec une trajectoire d'émission donnée, deux approches sont possibles : une approche top down ou une approche bottom-up.

L'approche top-down tente de décrire un système économique à partir du comportement des marchés et des préférences des acteurs. Adapté au contexte climatique, il part d'un budget carbone agrégé au niveau mondial et conduit des tests de résistance environnementaux au niveau des portefeuilles. Chaque portefeuille est impacté sous forme de bonus-malus selon sa composition en actifs à fort risque physique ou de transition ou leur contrepartie sans risque (actifs adaptés à une transition bas-carbone). Dans cette approche, la stratégie classique de diversification des actifs l'emporte sur la stratégie d'équivalence (financer un parc éolien ou solaire ne compense pas directement le risque associé au financement d'une mine de charbon à ciel ouvert, surtout si l'on postule que ces actifs à production intermittente requièrent une contrepartie de production pilotable carbonée ce que les scénarios de transition énergétique traduisent par l'option entre « sous contrainte carbone » ou « sans contrainte carbone »). Cela est un signe de bonne intégration de la prise en compte des enjeux environnementaux dans les stratégies financières classiques. Elle peut en revanche générer des biais sectoriels qui vont pénaliser les portefeuilles et les secteurs historiques et industriels en faveur de secteurs plus technologiques et serviciels sans tenir parfaitement compte de la dépendance des seconds, souvent à l'aval ou aux côtés des premiers.

L'approche bottom-up, liée aux techniques de mesure de l'empreinte carbone, utilise les méthodes de stress tests individuels ou sectoriels pour établir un bilan carbone agrégé selon trois niveaux d'émission. Cette approche est la plus usitée car elle correspond au mieux aux méthodes de gestion individuelle c'est-à-dire à l'échelle d'une entreprise, d'un investisseur ou même d'un Etat. Malheureusement elle peut subir un biais au niveau agrégé car elle additionne linéairement le poids de chaque empreinte au niveau individuel et engendre un surinvestissement⁸⁵.

⁸⁵ Par exemple pour Eric Cochard, directeur du Développement Durable à la CACIB, le bilan en « empreinte induite » du portefeuille agrégé de la CACIB est huit fois moins élevé que celui établi à partir des bilans individuels agrégés.

4.2. Conduite d'un stress test

La méthode du stress test climatique fait la synthèse des deux approches. Partant des informations sur les expositions individuelles des institutions financières (approche *Bottom up*), un stress test climatique doit pour autant s'affranchir de certaines hypothèses qui sous-tendent les exercices existants (notamment les stress tests réglementaires mis en place post-crise par les régulateurs prudeniels européens) pour mesurer une exposition crédible et cohérente aux risques climatiques. La mise en place de scénarios communs (approche *Top Down*) qui combine des effets climatiques, macroéconomiques et financiers peut servir de canevas pour la conduite de ces stress tests spécifiques.

Sur la conduite d'un test de résistance et de résilience du secteur bancaire européen, les travaux de Battiston et al. (2016) consacrent l'un des premiers exercices du genre même si d'autres travaux pionniers ont été réalisés par Van Tiburg et al. (2015). Les auteurs quantifient l'impact d'un choc sur la valeur de la dette et des cash-flows d'entreprises exposées directement et indirectement aux risques de transition énergétique. Ces secteurs sont identifiés : il s'agit des entreprises liées à la production et l'extraction d'énergies fossiles, des énergéticiens (« utilities ») et des entreprises exposées indirectement de par leur dépendance forte aux énergies carbonées (l'industrie lourde, le transport et le logement).

Ce stress test s'opère sur le marché actions et est effectué sur l'ensemble des expositions des agents financiers aux actions des entreprises cotées. L'impact de ce choc sur le système financier s'opère en deux temps : un premier temps relatif au choc de la valorisation des actifs, et un second temps qui mesure les effets de contagion du système financier. La perte de valorisation des portefeuilles d'investissement se traduit donc par une première réduction de la valeur de l'action et, dans un deuxième temps, de pertes supplémentaires liées aux interconnexions entre les acteurs financiers, relations interbancaires et la relation entre groupe et filiales, les véhicules de titrisation et les échanges de titres.

Selon Battiston et al. (2016), les pertes sur l'ensemble des entreprises des secteurs vulnérables impactent les acteurs financiers par une faible part dans un premier temps soit autour de 15 % de la valeur des portefeuilles titres des acteurs du système financier, 2,55 % de pertes sur les entreprises extractrices et productrices d'énergies fossiles, 1,24 % pour les énergéticiens, plus de 9 % pour les industries lourdes et moins de 2 % pour les secteurs du transport et du logement.

Cette part augmente à 30 % après la diffusion du choc dans les canaux du système financier par des effets de second tour : 6 % pour les industries fossiles, 3,75 % pour les énergéticiens, 18 % pour les industries lourdes et un peu plus de 2 % pour le transport et le logement.

4.3. Les outils de prédiction et leur limites : approche par les modèles prédictifs ou par l'élaboration de scénarios prospectifs

4.3.1. L'approche par la Climate VaR

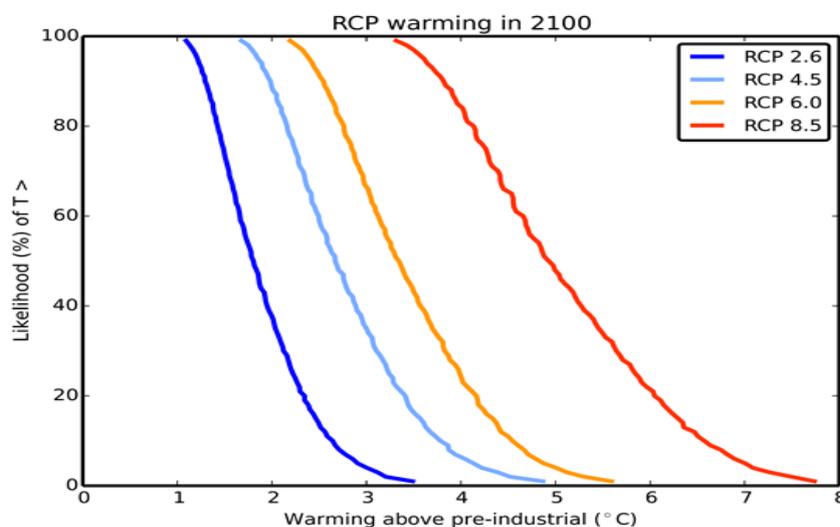
La *Value-At-Risk* représente la perte potentielle maximale d'un investisseur sur la valeur d'un actif ou d'un portefeuille d'actifs financiers qui ne devrait être atteinte qu'avec une probabilité donnée sur un horizon donné pour un certain niveau de confiance (généralement fixé à 95 %). Elle se mesure comme un quantile de la distribution de pertes et profits associée à la détention d'un actif ou d'un portefeuille d'actifs.

Afin de modéliser l'impact direct et contemporain du changement climatique sur la valorisation des actifs existants, Dietz et al. (2016) proposent de raisonner avec l'outil de *Value at Risk* (VaR). Les auteurs ont effectué cet exercice et montrent que la VaR climatique sur les actifs financiers mondiaux atteint dès aujourd'hui 1,8 % si l'on considère une trajectoire d'émissions *business as usual* (BAU) ce qui représente près 2 500 Md\$ (pertes actualisées associées à des événements probabilisés à 5% de chance de survenir). Ils démontrent également que le risque climatique se manifeste en queue de distribution : la VaR associée au 99^e percentile est de 16,9% ce qui représente 24 200 Md\$ de pertes potentielles, une décote très substantielle à l'échelle mondiale.

De plus, si la trajectoire des émissions devient compatible avec un réchauffement limité à 2°, la VaR à 5 % se réduit de 0,6 points de pourcentage, alors que la VaR calculée au 99^e percentile serait réduite de 7,7 points de pourcentage. Enfin, la valeur des actifs d'une trajectoire 2° serait de 0,2% plus élevée, une fois les coûts d'atténuation pris en compte, que la valeur des actifs pour une trajectoire BAU si l'on prend un intervalle de 95%. Elle serait plus élevée de 9,1% si l'on considère un intervalle de 99% (ou autrement dit si les acteurs sont davantage avertis au risque).

Le calcul de la VaR est conditionné par plusieurs hypothèses qu'il faut paramétrer à nouveau si l'on veut prendre en compte la modification de la distribution de probabilité d'événements extrêmes ainsi que les effets de grappe qui sont déterminants dans l'intégration par le marché des risques climatiques. Les risques climatiques physiques sont auto-corrélés et l'incertitude augmente avec le temps, à l'inverse de la plupart des risques dont l'intervalle de réalisation se réduit et se précise avec le temps (Figure 29) (King et al, 2015).

FIGURE 29. ESTIMATION DES NIVEAUX DE RECHAUFFEMENT ASSOCIEES AUX TRAJECTOIRES D'EMISSION DU GIEC ET LEUR PROBABILITE DE REALISATION



SOURCES : KING ET AL. (2015)

NOTES : LES DIFFERENTES COURBES INDIQUENT LA PROBABILITE ASSOCIEE A CHAQUE NIVEAU DE RECHAUFFEMENT POUR LES QUATRE DIFFERENTES TRAJECTOIRES D'EMISSION DE GES ESTIMEES PAR LE GIEC. PAR EXEMPLE ; POUR LA TRAJECTOIRE RCP 8.5 QUI CORRESPOND A LA TRAJECTOIRE D'EMISSION DE « LAISSER FAIRE » LA PROBABILITE D'ATTEINDRE UN RECHAUFFEMENT ENTRE 6 ET 7 DEGRES CELSIUS DEPASSE LES 20%

4.3.2. L'analyse par les scénarios

Il est important de noter que si les impacts d'un changement climatique sont effectivement pris au sérieux, alors il n'existe plus de trajectoire ou de scénario tendanciel « sans risques ». Si les systèmes continuent dans un fonctionnement « business as usual », alors ils s'exposent aux risques climatiques physiques. Si finalement les systèmes opèrent une transition bas-carbone, alors selon leur point de départ et leur courbe de transition, ils s'exposent à un risque de transition plus ou moins important.

L'intégration des risques climatiques selon la méthode des scénarios suppose donc l'élaboration et l'analyse conjointe de trois grands types de scénarios : (i) les scénarios climatiques purs qui projettent l'évolution des variables climatiques et météorologiques en fonction des trajectoires d'émission carbone (RPC pour *Representative Concentration Pathways*), à l'image des travaux menés par le GIEC au niveau mondial et pour la France (et en déclinaison régionale) par le Centre national de recherches météorologiques CRNM et l'institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL)⁸⁶ ; (ii) les scénarios de transition posent un cadre économique à l'adoption d'une trajectoire bas-carbone ; et enfin (iii) les scénarios climatiques de synthèse qui tentent d'évaluer des projections de

⁸⁶ <http://www.meteofrance.fr/actualites/23943296-rapport-sur-le-climat-de-la-france-au-21e-siecle>

variables macroéconomiques et financières en fonction des évolutions des différentes variables climatiques, qu'elles soient environnementales (température, niveau des mers) ou plus politiques (prix du carbone et des matières premières).

4.3.2.1. Scénarios climatiques

Les scénarios climatiques ont été élaborés par les membres du GIEC au moment de la constitution du 5^e rapport publié en 2014. Ils reprennent les trajectoires d'émission et de concentration de gaz à effet de serre et leurs effets probabilisés sur les grands indicateurs climatiques, notamment la hausse des températures et d'élévation du niveau des océans. Les experts du GIEC⁸⁷ ont détaillé 4 RPC (*Representative Concentration Pathways*) dont les données sont disponibles en libre accès⁸⁸ et dont les niveaux d'émissions de GES associés sont montrés en Figure 30.

Les trajectoires établies par le GIEC nous donnent une idée sur la distribution de probabilité des changements climatiques engendrés par le forçage radiatif. Une estimation de la distribution des probabilités des températures permet d'estimer d'une part les décalages de moyennes (intervalles de confiance mentionnés plus hauts) mais aussi les évolutions de la variance et des queues de distribution qui présagent l'augmentation de l'occurrence des valeurs extrêmes (Figure 29).

⁸⁷ RCP 2.6: van Vuuren, D., M. den Elzen, P. Lucas, B. Eickhout, B. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, R. van Houdt, 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-006-9172-9.

RCP 4.5: Clarke, L., J. Edmonds, H. Jacoby, H. Pitcher, J. Reilly, R. Richels, 2007. Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, 7 DC., USA, 154 pp.

Smith, S.J. and T.M.L. Wigley, 2006. Multi-Gas Forcing Stabilization with the MiniCAM. *Energy Journal* (Special Issue #3) pp 373-391.

Wise, MA, KV Calvin, AM Thomson, LE Clarke, B Bond-Lamberty, RD Sands, SJ Smith, AC Janetos, JA Edmonds. 2009. Implications of Limiting CO2 Concentrations for Land Use and Energy. *Science*. 324:1183-1186. May 29, 2009.

RCP 6.0: Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, Y. Matsuoka, 2006. Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *Multigas Mitigation and Climate Policy*. The Energy Journal Special Issue.

Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, M. Masui, and M. Kainuma, 2008. Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Journal of Global Environmental Engineering* 13, 97-108.

RCP 8.5: Riahi, K. Gruebler, A. and Nakicenovic N.: 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* 74, 7, 887-935.

⁸⁸ - RCP 2,6 : correspond à un forçage radiatif de 2,6W/m² en 2100 par rapport à 1750. C'est le seul scénario compatible avec une forte probabilité de limite du réchauffement climatique en dessous de 2° (la température terrestre sera contenue dans un intervalle [0,4° ; 1,7°] avec une probabilité de 60%). Pour être réalisé, ce scénario suppose que les émissions de GES atteignent un pic dès 2020 et que l'on arrive d'ici à 2100 à des flux d'émissions nettes totales négatifs.

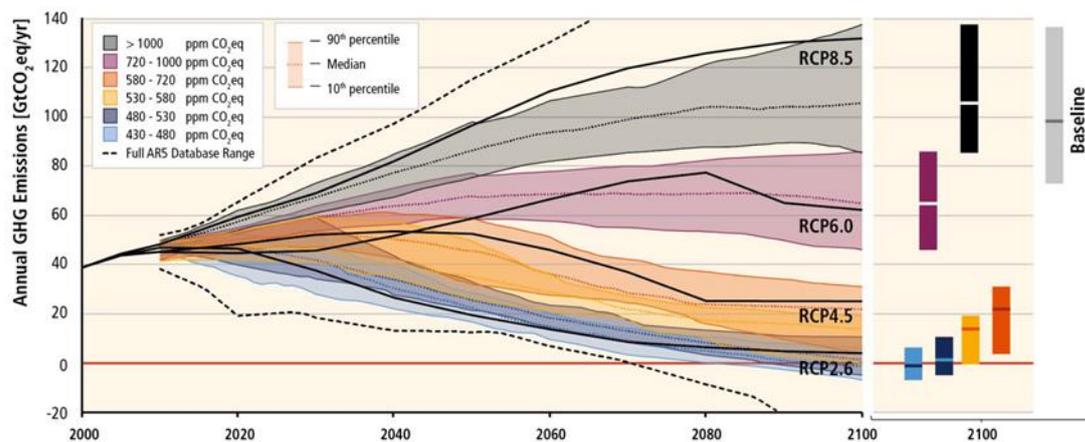
- RCP 4,5 : correspond à un forçage radiatif de 4,5W/m² en 2100 par rapport à 1750. Ce scénario suppose une stabilisation des flux d'émission d'ici à 2050. L'intervalle de réchauffement est mesuré à [0,9° ; 2,6°].

- RCP 6,0 : correspond à un forçage radiatif de 4,5W/m² en 2100 par rapport à 1750. Ce scénario suppose une stabilisation des émissions d'ici à 2085 et un intervalle de réchauffement à [0,8° ; 3,1°].

- RCP 8,5 : La trajectoire « business as usual » qui suppose la stabilité de la croissance des émissions au taux observé ces dernières décennies à savoir une croissance du flux d'émission de 2,2% par an. Ce scénario tendanciel prévoit une augmentation des températures de 4° d'ici à 2100 soit un intervalle de [1,4° ; 4,8°]. Les températures continuent d'augmenter après 2100 en l'absence de stabilisation des émissions.

Ces scénarios nous donnent une idée de la temporalité des perturbations climatiques et leurs trajectoires d'émissions associées qu'elles soient la résultante d'une tendance passive ou un objectif et un effort de stabilisation et de transition à adopter. Néanmoins, ils ne permettent pas de réduire l'incertitude intrinsèque liée à la compréhension complète des interactions entre les différents mécanismes climatiques notamment leur endogénéité et l'impact des effets de seuil (dégradations climatiques irréversibles et dont l'effet sur l'écosystème et le forçage radiatif est difficile à mesurer) (King et al., 2015).

FIGURE 30. TRAJECTOIRES D'EMISSIONS DE GES ENTRE 2000 ET 2100 DU GIEC (RCP)



SOURCE: (KING ET AL. 2015).

NOTES : LES EMISSIONS SONT CALCULEES EN GIGATONNES EQUIVALENT CO2 ANNUELLES AVEC UN INTERVALLE DE CONFIANCE ENTRE 5 % ET 95 %. LE SCENARIO RCP 2,6 (CONCENTRATION CARBONE A <450 PPM) PREVOIT UNE NEUTRALITE CARBONE POUR 2100.

L'impact économique des scénarios climatique est la brique manquante pour tenter de mesurer l'exposition du secteur financier au changement climatique. Dans cet exercice se cristallise tout l'enjeu conceptuel de l'externalité climatique. En prenant un horizon de 25 ans, plus court que ceux utilisés dans les modèles climatiques usuels, la FFA dans son exercice de mesure des risques climatiques physiques tente de dépasser la tragédie des horizons évoquée par (Carney, 2015). On a vu plus haut que l'horizon choisi constitue déjà un plan de long terme pour des arbitrages économiques financiers mais n'obtient que de faibles montants quant aux risques encourus à moyen terme et qui ne permettra sans doute pas de déclencher une action immédiate de recalibrage des risques, pourtant nécessaire pour éviter l'explosion des risques physiques et leurs conséquences à très long terme.

4.3.2.2. Scénarios de transition

Un scénario de transition tente de projeter la capacité des économies à fonctionner dans un contexte de transition énergétique bas-carbone en fonction de la temporalité et de l'intensité des trajectoires d'investissement et de politique publique empruntées.

Le scénario 2° correspond à une trajectoire bas-carbone comme celle proposée dans le dernier rapport du GIEC (RCP 2.6 et IPCC AR5). Il suit une trajectoire normative et tente d'établir un état des lieux des efforts en matière d'investissement et de conversion des systèmes pour limiter le réchauffement à 2°. Ce scénario traduit une croyance forte et universelle que le monde ne peut pas se permettre de se réchauffer d'avantage que de 2° sans en payer un prix fort. En découle une valeur sociale du carbone élevée (aux alentours de 100€ la tonne selon les estimations de Stern, 2007) et suffisamment contraignante pour que le budget carbone soit respecté, que l'extraction d'énergies fossiles ait finalement disparu et soit remplacé par une offre dédiée aux technologies bas-carbone. Les économies parviennent à opérer une transition énergétique bas-carbone en réduisant drastiquement leur dépendance aux énergies fossiles, grâce notamment à un bond technologique en matière d'énergies bas carbone (renouvelables) et d'efficacité énergétique et dans l'utilisation des terres agricoles.

Un autre type de scénario de transition peut être proposé. Au lieu d'opter pour une trajectoire normative, une analyse positive peut être réalisée pour établir l'exposition des secteurs économiques et financiers. Dans ce contexte, l'ESRB envisage dans son rapport (This et Schoenmaker, 2016): un premier scénario de prise de conscience et de transition immédiate, régulière et progressive ; et un second scénario, plus brutal de réduction des émissions par décarbonation drastique et mise en demeure des actifs les plus polluants.

4.3.2.3. Scénarios de synthèse

La construction des scénarios de synthèse tente le difficile exercice de projeter à moyen et long terme (les projections sont le plus souvent à 20, 40 et 50 ans) le résultat le plus fidèle possible des mécanismes d'interactions entre les variables climatiques et les variables macroéconomiques et tente d'en déduire la résilience systémique à un choc climatique. Une multitude de scénarios existe (Table 26). Ils sont réalisés par des institutionnels (la Commission européenne, l'ADEME en France, l'AIE, le World Energy Council, etc.), des structures collaboratives de recherche (ANCRE, Energy Modelling Forum, etc.) des organisations non gouvernementales (Negawatt, Negatep, etc.) et des organismes privés (BP, Exxon Mobil, Enerdata, etc.) mais trop peu d'entre eux intègrent la variable financière de manière pleine et entière.

La construction de scénarios économiques et/ou réglementaires peut s'effectuer de diverses manières dont deux principales. Soit on choisit de raconter une histoire plausible (*storytelling*) et d'en évaluer le niveau d'anticipation, soit l'on choisit de mesurer la résistance des actifs à une situation décontextualisée de choc.

Dans le premier cas de figure, l'objectif est d'élaborer un contexte global le plus réaliste et proche de sa réalisation possible afin d'établir l'adéquation des positions et stratégies adoptées présentement à un futur proche et hautement probable. Un exemple type est de tester quel est le niveau de préparation des activités et des portefeuilles à la remontée des taux directeurs américains. Cette approche nécessite une validité scientifique et doit être inscrite dans un souci de réalisme et de précision fiable que ce soit sur la réalisation des variables projetées ou sur l'ensemble des mécanismes économiques et financiers présents. Un scénario de ce type ne peut donc être robuste qu'à un horizon de projection raisonnablement court.

Dans le deuxième cas de figure, il s'agit plutôt d'identifier et tester la résistance de certains points d'exposition sensibles. La démarche est alors différente car il s'agit de tester la sensibilité des actifs et des stratégies à un choc déterminé plus ou moins profond et certain et dont les mécanismes de transmission et d'amplification ne sont pas forcément connus. Cette approche s'effectue donc à rebours (*backcasting*) : à partir d'un scénario décontextualisé de choc, l'objectif est d'établir la connaissance de la résilience actuelle des actifs et d'identifier éventuellement des poches de vulnérabilité. Un niveau de résilience optimal, dans le sens acceptable au vue des paramètres d'amplitude et de réalisation des chocs scénarisés, dans l'allocation future des actifs. Par exemple, ce type d'exercice est utilisé pour établir les stratégies de repli et de continuité au sein de la direction des risques opérationnels (quelle est la marche à suivre si je me trouve amputé de l'accès aux plateformes de refinancement).

TABLE 26. EXEMPLES D'ETUDES PROSPECTIVES UTILISANT LES SCENARIOS DANS LE SECTEUR DE L'ENERGIE

	Auteur	Pays	Utilisation modèle(s) ?	Scénarios			
				Couverture géographique	Couverture sectorielle	Horizon temporel	Trajectoires ?
ADEME <i>Visions énergétiques 2030 - 2050 de l'ADEME</i>	Institutionnel	France	Non	France	Secteur énergétique : offre et demande	2050	Non
ADEME <i>Mix électrique 100% ENR ?</i>	Institutionnel	France	Oui	France + pays frontaliers	Production, stockage, consommation et échanges électricité	2050	Non
BP <i>BP Energy Outlook</i>	Privé	UK	?	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2035	Oui
ExxonMobil <i>The outlook for Energy : A View to 2040</i>	Privé	US	?	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2040	Oui
RTE <i>Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France</i>	Privé pour institutionnels	France	Oui	Europe de l'Ouest (12)	Production, stockage, consommation et échanges électricité	2030	Non
Agence Nationale de la Coordination de la Recherche pour l'Energie <i>Scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique</i>	Académiques et centres techniques / recherche	France	Non	France	Secteur énergétique : offre et demande	2050	Oui
Enerdata <i>Global Energy Scenarios to 2040 / Understanding our energy futur</i>	Privé	France	Oui	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2040	Oui
AIE <i>World Energy Outlook</i>	Institutionnel	International	Oui	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2040	Oui
Commission Européenne <i>EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050 / Reference scenario 2013</i>	Académiques et centres recherche pour institutionnels	Europe	Oui	Europe des 28	Secteur énergétique : offre et demande	2050	Oui
AIE <i>Energy Technology Perspectives 2015 - Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action</i>	Institutionnel	International	Oui	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2050	Oui
World Energy Council <i>World Energy Scenarios Composing energy futures to 2050</i>	Mixte (alliance)	International	Oui	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2050	Oui
Energy Modelling Forum <i>Publications relatives aux exercices de l'EMF</i>	Académiques essentiellement	International	Oui	Variable selon exercice	Variable selon exercice : Economie globale ou secteur énergétique	2050+	Oui

SOURCES : HACHE ET AL. 2016

Enfin, pour l'élaboration des trajectoires climatiques et économiques, il est possible soit de proposer une analyse qualitative, soit de passer par des modèles économiques. (Hache et al, 2016⁸⁹) distingue trois sous-classes en fonction du mode de résolution en partant de la typologie proposée par (Percebois et Hansen, 2010) : «

- Les modèles macro-économétriques (HERMES, NEMESIS...) sont estimés à partir de données chronologiques ou de données de panels. Ils calculent à tous les niveaux la production, les prix, la compétitivité, l'emploi et le chômage global ;
- Les modèles d'équilibre général calculable (GEM-E3, GEMINI, EPPA, IMAGE...), sont généralement fondés sur des anticipations adaptatives et résolus par récursion. Ils sont composés d'agents hétérogènes ayant leur propre fonction objectif (maximisation de l'utilité pour le consommateur, maximisation du profit pour les producteurs) ;
- Les modèles d'équilibre général ultra-rationnels (MERGE, DICE...) sont fondés, à l'inverse des précédents, sur les anticipations rationnelles et l'information parfaite : l'optimisation se fait en général simultanément sur toute la période de projection. »

Parmi cet ensemble ; certains modèles d'évaluation intégrée (IAM ou *Impact Assessment Models*), développés dès les années 2000 ont fait l'objet de nombreux développements, certains intégrant des blocs de mécanismes financiers; citons notamment :

- Le modèle DICE (*Dynamic Integrated Climate and Economy* ; Nordhaus, 2008) et son développement régional le modèle RICE (*Regional Integrated Climate and Economy*)
- Le modèle PAGE (*Policy Analysis of the Greenhouse Effect*; Hope, 2006)
- Le modèle FUND (*Climate Framework for Uncertainty, Distribution and Negotiation*; Tol, 2002)

Ces modèles d'intégration climat et macroéconomiques sont basés sur l'évaluation de fonctions de dommages à la Nordhaus. Ils sont encore largement en phase de construction et font l'objet de vifs débats théoriques comme appliqués (Pindyck ; 2015), notamment sur le niveau d'incertitude des relations et des mécanismes qu'il existe entre les variables climatiques et les variables macroéconomiques et la sensibilité des modèles aux hypothèses et aux paramètres arbitraires, en particulier en ce qui concerne le taux d'actualisation.

Très peu de modèles intègrent la sphère financière et ses dynamiques dans leur approche. A ce titre nous pouvons citer les travaux de l'AFD en collaboration avec le GIEC qui ont développé le

⁸⁹ Etude SCORE LCA n° 2015-07 42 de janvier 2017

modèle GEMMES-Monde⁹⁰. Le modèle Gemmes (pour *Generalized Monetary Multisectoral Macrodynamics for the Ecological Shift*) est un outil de modélisation macroéconomique qui intègre les dynamiques de la sphère financière et leurs relations avec le changement climatique à partir d'un modèle complexe de déconvolution de Goodwin-Keen dans le but d'analyser leurs influences sur l'environnement macroéconomique à long terme. D'autres modèles intègrent des agrégats monétaires et des dynamiques financières (Comerford et Spiganti 2016 ; Dafermos et al., 2016 ; Schlag et al. (2016)). A ce jour, la plupart de ces modèles ont une approche centrée sur le risque lié aux portefeuilles d'actifs et à la dette de marché (Battiston et al., 2016). A notre connaissance, aucun modèle n'a développé de mécanisme qui intègre des dynamiques microéconomiques de crédit bancaire.

Ainsi, alors que les scénarios climatiques intégrés sont discutés d'un point de vue théorique et empirique, les quelques scénarios macroéconomiques incluant le secteur financier en sont encore au stade du balbutiement, et sont très complexes. En bref, les modèles appliqués au secteur bancaire ne sont pas encore apparus.

4.4. L'empreinte carbone comme outil de mesure de l'exposition du bilan des institutions financières aux risques climatiques.

Il est possible de mesurer l'empreinte carbone d'un projet d'investissement, un portefeuille d'actifs, le bilan d'une institution financière, d'un secteur ou même d'un pays tout entier. Il existe différents niveaux (ou *scopes*) pour mesurer l'empreinte carbone à l'échelle individuelle. Ces différents niveaux de cette empreinte carbone (ci-après *scopes*) reflètent la granularité et le périmètre de calcul de l'impact carbone de l'entité en question. Ces *scopes* sont au nombre de 3. Les *scopes* 1 et 2 mesurent les émissions de GES liées à la consommation en énergie de l'émetteur. Le premier niveau comptabilise les émissions directes liées à la consommation des matières premières des actifs détenus par l'entité. Le second niveau comptabilise les émissions qui résultent de l'achat d'énergie secondaire (électricité). Elles se mesurent en valeur absolue (tonne de CO₂ équivalent) ou en relatif c'est à dire en intensité carbone (par exemple en tonne de CO₂ équivalent par € de chiffre d'affaire). Le *scope* 3 fait état des émissions indirectes des émetteurs. Il recouvre l'ensemble des émissions indirectes résultant de la chaîne de valeur, incluant donc les émissions des clients et des fournisseurs. Adapté à une institution financière, le *scope* 3 retrace les émissions des actifs détenus au bilan des investisseurs, et les émissions des crédits accordés au passif des établissements bancaires.

⁹⁰ http://www.environnement.ens.fr/IMG/pdf/gael_giraud_coping-collapse-stock.pdf <https://issuu.com/objectif-developpement/docs/29-papiers-recherche>

Une fois l’empreinte établie ; il existe plusieurs manières d’en disposer sous la forme d’indicateurs : les émissions en valeur absolue, l’efficacité carbone et l’intensité carbone. L’indicateur de mesure de l’empreinte carbone en valeur absolue se compte en tonnes de CO₂ équivalent (les émissions des autres gaz à effet de serre sont converties en émissions équivalentes de CO₂) et répertorie le flux contributif de l’activité de l’émetteur en global. Il s’agit d’un indicateur universel donc facilement comparable mais non performantiel. L’indicateur d’efficacité carbone mesure le volume d’émissions de CO₂ en fonction d’un indicateur physique pertinent d’activité (m², km, kWh, habitant) et permet de relier l’empreinte carbone de l’activité au niveau de service rendu par cette dernière et de sa performance. Cet indicateur est toutefois limité à la comparaison par l’unité dans laquelle il s’exprime et donc à des comparaisons souvent sectorielles ou spécifiques. Le dernier indicateur est une mesure de l’intensité carbone et prend une dimension monétaire : il se mesure en volume d’émissions rapporté à un indicateur financier ou macroéconomique pertinent (PIB, chiffre d’affaire, valeur ajoutée). Cet indicateur est à la fois universel et pertinent pour rendre compte de l’intensité carbone de l’activité économique.

Les applications des outils de Bilan Carbone à l’industrie en France révèlent que ces derniers revêtent un certain caractère performatif (Breton et Aggeri, 2015) que n’ont pas les outils anglo-saxons qui s’inscrivent dans une dimension comptable pure. L’application de l’empreinte carbone au bilan des institutions financières, c’est-à-dire à la fois à leurs portefeuilles de titres mais aussi à leur portefeuille de crédits peut donc se traduire par une incitation à l’adoption d’optimisation de ce bilan carbone.

4.5. Un besoin d’évolution des données actuelles

Dans la mesure de l’exposition du portefeuille d’activité des banques aux risques climatiques, la question des données et de l’information (sa disponibilité mais aussi sa pertinence et sa fiabilité) est décisive. Dans une perspective qui se légitime plus de l’accompagnement que de la contrainte, le régulateur bancaire, en l’occurrence l’ACPR peut être amené à demander aux banques un certain nombre de données et d’informations stratégiques afin de constituer un socle de connaissance et une base d’élaboration d’outils de mesure de l’impact des risques climatiques sur le secteur bancaire.

Ces informations peuvent être soit mobilisables immédiatement et à moindre coût car déjà répertoriées dans les systèmes internes (approches sectorielle et macroéconomiques au sens large), soit elles ne sont pas immédiatement disponibles et/ou lisibles par les acteurs, soit enfin elles sont

inexistantes dans l'état actuel des systèmes (empreinte carbone individuelle élargie de l'ensemble des acteurs de l'économie réelle ou financière).

4.5.1. Mise en place d'un système d'information spécifique

La mise en place d'un système d'information spécifique aux enjeux climatiques est importante pour saisir pertinemment l'impact des risques climatiques physiques et de transition. La prise en compte de ces risques, leur matérialisation à court et moyen terme et leurs canaux de transmission permettent d'enrichir et de réévaluer l'exposition finale aux risques de bilan existant : les risques opérationnels, les risques de crédit, les risques de marché et les risques de liquidité. Les données nécessaires pour évaluer les risques climatiques doivent observer certaines caractéristiques et un niveau de précision qui peut poser des difficultés de collecte importantes. Ces caractéristiques sont les suivantes :

Localisation géographique : La dimension géographique des données (croisement de données sur le pays, la zone climatique, la région, le département, et enfin la boîte postale (au niveau le plus fin) est primordiale dans la détermination de l'exposition aux risques climatiques physiques mais elle révèle aussi une importance (à une échelle plus large toutefois) dans la mesure des risques de transition vis-à-vis de l'implémentation de politiques et stratégies de transition énergétique au niveau local, régional ou national.

Données désagrégées : Afin d'apprécier si les actifs sont plus ou moins résilients aux risques climatiques et émanent de perturbations physiques ou d'une contrainte de transition bas-carbone, il est déterminant de connaître, en plus des éléments géographiques, des éléments microéconomiques sur la nature de l'activité (empreinte carbone directe et indirecte), sur les coûts (fixes et opérationnels) et de technologie (mix et performance énergétique). Une première approche sectorielle fine est utile pour déterminer les secteurs les plus émetteurs, consommateurs et dépendants d'une énergie carbonée (ou d'une matière première fortement émettrice de GES). L'approche sectorielle pure est néanmoins insuffisante pour apprécier précisément l'enjeu pour la banque et son bilan. En effet, au sein d'un même sous-secteur, il existe des agents qui ont su se couvrir des risques climatiques physiques ou encore sont résilients, voire même parfois acteurs de la transition énergétique bas-carbone et la baisse de l'utilisation des énergies fossiles. L'acquisition de données désagrégées plus microéconomiques permet d'évaluer plus finement les risques de transition qui échouent les actifs des agents les moins préparés, les plus captifs et les plus vulnérables.

Vision prospective et non historique : L'information doit être axée sur l'exposition aux tendances futures plutôt que sur des hypothèses d'exposition et de risques figées dans le temps. Il est nécessaire d'obtenir des informations détaillées selon les maturités et la liquidité des engagements. Ce type de démarche, requiert d'adopter une approche par bilan dynamique plutôt que l'approche par bilan statique observée actuellement et utilisée dans le cadre du stress test réglementaire de l'EBA.

Données complètes : L'information doit s'établir sur un périmètre global afin d'intégrer des éléments de scope 3 (cycle de vie). Une information complète qui contient des éléments en amont et en aval de l'actif considéré permet une distinction entre les détenteurs d'actifs contraints (price taker) et captifs (substituabilité du capital) et les détenteurs d'actifs résilients, liquides ou diversifiés.

4.5.2. La question de l'accès et de la disponibilité des données

Les banques sont exposées à un risque de crédit qui découle d'un risque climatique physique indirect (ou de second tour) qui proviendrait des assureurs. Exposés aux risques physiques directs (ou de premier tour) les assureurs peuvent, par leur stratégie de couverture, influencer sur la valeur de l'actif et la solvabilité de la contrepartie de par les effets d'un retrait ou d'un renchérissement de la couverture assurantielle. Afin de mesurer ces risques, le croisement de la localisation du bien financé (par boîte postale), la valeur de l'actif (couverture assurance) et son taux de couverture vont être des informations déterminantes. Toutefois, la production et / ou l'accès à ces informations se heurtent à plusieurs obstacles majeurs :

L'information sur la couverture d'assurance doit être précise (taux de couverture, poids dans le financement), crédible (refléter la valeur réelle et non déclarée par l'assuré qui a tout intérêt à ne pas divulguer l'information) et fiable (mise à jour à chaque renégociation) : ce degré de complétude et de précision, s'il existe à un niveau systématique, est une information à valeur hautement stratégique à partir du moment où le secteur est concurrentiel.

L'information sur la localisation géographique d'un crédit est une donnée qui semble facilement accessible à première vue mais qui nécessite de préciser certains points cruciaux à l'échelle du marché de crédit aux particuliers mais surtout à l'échelle du marché de crédit aux entreprises.

A l'échelle du portefeuille de crédits aux particuliers, l'adresse des crédits immobiliers financés est une information normalement disponible lors de l'origination (démarche opérationnelle de l'établissement du contrat de crédit). Toutefois, la norme comptable actuelle veut que soit

centralisée et accessible, l'adresse du ménage ayant contracté le contrat de crédit et non l'adresse du bien financé. Les contrats de financement des résidences secondaires ne renseignent pas forcément l'adresse du bien mais plutôt celle du contrat (résidence principale, adresse qui héberge les comptes bancaires et non les actifs financés). Ce constat est d'autant plus pertinent qu'il est fort probable de retrouver ces résidences secondaires dans des zones à plus fort risque climatique physique (lieux de villégiatures en littoral ou en montagne).

A l'échelle du portefeuille de crédit aux entreprises, la localisation des actifs financés est encore plus complexe à déterminer et ce, pour deux raisons principales. D'une part parce que, de la même manière que pour le crédit aux ménages, la localisation renseignée est avant tout liée au contrat et non à l'actif lui-même. Le financement d'un entrepôt ou d'une usine située en bord de mer sera répertorié à l'adresse du souscripteur du crédit, autrement dit au siège de l'entreprise qui peut parfois être situé très loin de ses outils de production. D'autre part, le risque de crédit dépend de la valeur de l'actif soumis aux risques climatiques. Dans le cas d'une industrie manufacturière localisée en zone à risque, le risque de crédit encours tout autant sur l'entrepôt et les murs de l'usine (financés en crédit long terme ou par dette obligataire auprès d'un établissement de crédit), et tout autant sinon plus sur le matériel qu'il renferme, matériel financé probablement en crédit-bail auprès possiblement d'un autre organisme de crédit. Sur ce dernier point, la difficulté de collecter une information de localisation de l'actif meuble est palpable.

5. Le rôle de la régulation financière et bancaire dans l'intégration des risques climatiques

La finance et le climat sont portés par deux révolutions idéologiques récentes. La crise financière de 2008 a renforcé l'idée que les marchés financiers et les institutions privées qui les constituent ne sont pas parfaits. Elle a permis le renforcement du socle de surveillance et de régulation financière, axé sur la recherche de résilience individuelle et systémique. La diplomatie climatique de 2015 s'est quant à elle accordée sur le fait que le climat a besoin des marchés financiers pour orchestrer et s'engager sur une trajectoire qui satisfait les enjeux climatiques mondiaux. Les acteurs financiers ont la mission de réaligner les flux financiers vers des actifs qui contribuent (ou du moins qui sont compatibles) avec le budget carbone mondial. Ils sont en mesure de le faire s'ils internalisent correctement les risques associés à la poursuite des activités qui ne prennent pas en compte ce budget carbone ou encore si une transition énergétique s'opère dans de mauvaises conditions et ampute brutalement une partie des systèmes économiques non adaptés à une économie bas-carbone. Toutefois, la crise financière et bancaire de 2008 a montré que les

institutions financières individuelles (tout comme l'ensemble des agents économiques et politiques) n'étaient pas toujours capables d'évaluer avec justesse le niveau de prudence nécessaire pour évoluer sur leur marché. Dans ce cadre, l'apparition de ces nouveaux risques à appréhender pose la question du rôle des régulateurs financiers et bancaires. Celui-ci est double : (i) s'assurer de la capacité du secteur financier à correctement intégrer ces risques et à leur devenir résilients en cas de choc (approche microprudentielle) et (ii) s'assurer de la stabilité du système financier dans son ensemble dans le cas où les stratégies individuelles de couverture des risques climatiques ne permettent pas de couvrir l'ensemble des risques à un niveau agrégé, autrement dit si la somme des optimum individuels n'aboutit pas à l'optimum social dû à la présence de défaillances de marché (Brunnermeier et al., 2009) (approche macroprudentielle).

Cette section se penche sur leur mise en œuvre pratique dans les cadres réglementaires existants, le cadre microprudentiel et le cadre macroprudentiel, et la meilleure approche à adopter pour intégrer les risques climatiques dans la sphère bancaire. Nous étudions notamment si les outils macroprudentiels développés après 2008 pour mitiger le risque systémique financier sont adaptables et suffisants pour adresser un risque systémique climatique. Nous voulons montrer en quoi la réglementation prudentielle actuelle, même si elle a beaucoup évolué ces dix dernières années en réponse aux défaillances révélées par la crise, doit prendre aussi en compte les enjeux climatiques dans son agenda. En effet, si elle demande davantage aux entités régulées d'intégrer les risques climatiques dans l'évaluation de leur profil de risque, les autorités de régulation micro- et macroprudentielles doivent elles-aussi prendre conscience que le cadre actuel, au mieux, ne crée pas d'incitation, et au pire, crée un cadre défavorable à la transition et la résilience des portefeuilles d'actifs (qu'ils soient sous la forme d'investissement ou de financement) à une économie bas-carbone.

5.1. Le rôle de la réglementation prudentielle

La régulation financière a pour objectif principal de protéger les épargnants et les investisseurs. Elle opère essentiellement sur deux fronts : la régulation des transactions financières et la surveillance de la solvabilité des institutions financières. Ces deux segments sont assurés par des autorités publiques. En France, la régulation des marchés financiers est assurée par l'Autorité des Marchés Financiers (AMF) et la surveillance des institutions financières principalement par l'Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution (ACPR) en coordination avec l'AMF. Nous allons nous intéresser dans cette partie à la régulation des institutions bancaires, laissant de côté celle des marchés financiers, appelant à une toute autre dynamique.

La réglementation prudentielle est apparue en appui de la régulation financière pour réguler les mécanismes d'intermédiation financière (Dewatripont et Tirole, 1994). L'objectif est double, d'une part il s'agit de protéger les créances des agents qui subissent des asymétries d'information (Stiglitz, 1994) et d'autre part de contenir les « effets de domino » en maintenant l'intégrité du système et éviter les collapsus néfastes pour l'économie dans son ensemble (ce qui rejoint le premier objectif de la réglementation prudentielle et justifie le sauvetage de banques d'affaires qui n'ont pourtant pas de clients mal informés ni de petits déposants mais dont la chute représente une menace pour le système financier dans son ensemble). On dit alors qu'elles sont porteuses de risque systémique (Acharya, 2001, 2009).

5.1.1. La réglementation microprudentielle

Dans les années 1980, le système financier a connu, suite à la fin du régime de changes fixes de Bretton Woods en 1971, une phase dite des 3D (désintermédiation, décloisonnement, dérèglementation), propulsant les banques d'investissement notamment américaines à exporter leur modèle à l'international. Afin de poser les premiers garde-fous à cet essor, la communauté internationale instaure les premières règles uniformisées à l'échelle mondiale issues du premier Accord de Bâle en 1988.

Hébergé par la Banque des Règlements Internationaux (ou *Bank for International Settlements, BIS*), le Comité de Bâle (ou *Basel Committee on Banking Supervision, BCBS*), créé en 1974 par les gouverneurs des banques centrales du G10⁹¹ impose aux institutions bancaires de détenir suffisamment de fonds propres pour couvrir un risque de pertes sur les crédits accordés. Ce ratio de fonds propres à détenir est fixe mais le volume d'actifs à assurer est déterminé selon une règle de pondération qui varie selon leur degré d'exposition au risque (probabilité de défaut).

Bâle 1 et le ratio Cooke : Le premier accord de Bâle fait naître le ratio de solvabilité renommé le ratio Cooke du nom du premier président du comité de Bâle. Selon le ratio Cooke, un intermédiaire financier doit détenir au minimum 8% de ses actifs en capitaux propres qui se divisent en trois catégories : le noyau dur ou TIER 1 (qui doit être au minimum de 4 % des actifs détenus), les fonds propres complémentaires ou TIER 2, les fonds propres sur-complémentaires ou TIER 3 (Figure 31).

⁹¹ Le G10 ou Groupe des dix est lié aux pays qui ont participé aux accords généraux d'emprunt (AGE) mis en place par le FMI en 1962 et composé de Allemagne, Belgique, Canada, États-Unis, France, Italie, Japon, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède, Suisse.

FIGURE 31. STRUCTURE DE BILAN BANCAIRE EXIGENCES REGLEMENTAIRES

Actif		Passif	
Prêts	Prêts à l'économie réelle PME-ETI (*1) Particuliers (*0,5) Collectivités locales (*0,2)	CET 1 (Common Equity Tier One) Actions Bénéfices réinvestis	Fonds Propres
	Autres prêts Prêts sur le marché monétaire (*0,2)	CET 2. (Tier 2) Dette hybride (dette subordonnée, actions préférentielles, obligations sécurisées convertibles)	Dette long terme
Actifs détenus sous la forme de titres	Actifs sûrs Bons du Trésor (*0) Obligations souveraines AAA (*0)	Dépôts non assurés Dépôts supérieurs à 100 000€ (dépôts entreprises) Emprunts interbancaires	Dépôts (dette court terme)
	Actifs risqués Titres de dette et actions détenus pour compte propre	Dépôts assurés Dépôts inférieurs à 100 000€	

SOURCE ; AUTEUR

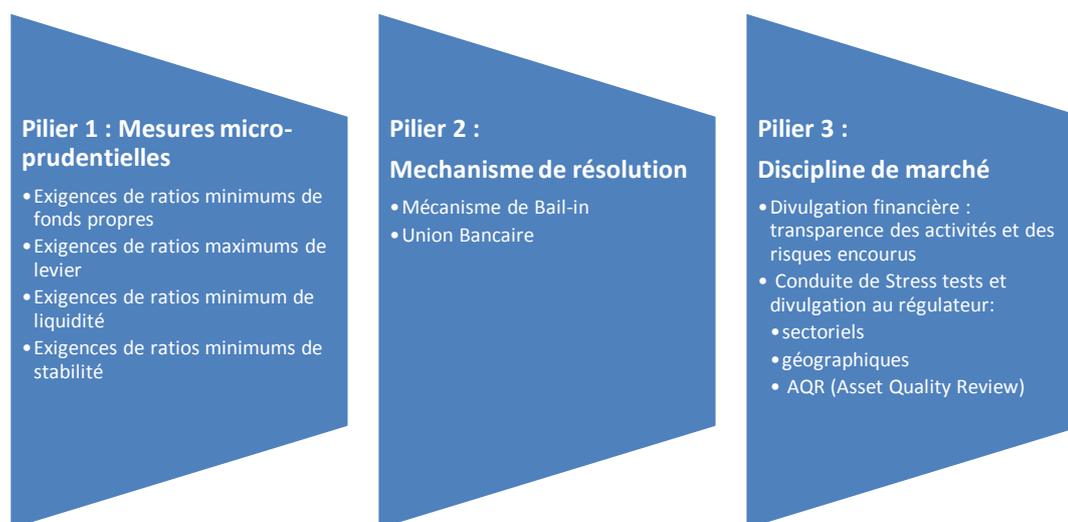
Bâle 2, le ratio de McDonough et les trois piliers Bâlois: Le cadre de Bâle 2 fut mis en place en 1990 pour une mise en application en 2007. Les nouvelles règles intègrent, en plus des risques de crédit, les risques opérationnels et les risques de marché. Le ratio Cooke est de fait remplacé par le ratio McDonough, qui prévoit que les fonds propres de la banque soient supérieurs à 8 % des risques de crédits (85 % du ratio) plus des risques de marché (5 % du ratio) plus des risques opérationnels (10 % du ratio). Les accords de Bâle 2 reviennent également sur la définition de la qualité des actifs détenus, afin d'accompagner le déploiement d'une comptabilité en valeur de marché et non plus en valeur historique. En les comparant à des actifs similaires sur des marchés suffisamment liquides, la valeur des actifs détenus reflète d'avantage leur prix en cas de revente –

valeur liquidative – et forment au bilan un profil de risque plus proche de la réalité des marchés. En ce sens, avec l'essor du rôle des agences de notation pour évaluer la solidité des actifs en condition réelle de marché, Bâle 2 permet l'utilisation de modèles internes pour les plus grandes institutions. La mise en place d'une structure de dialogue entre banque et régulateur et de mécanismes de résolution permettant une flexibilité dans l'ajustement des exigences prudentielles constitue le second pilier du cadre Bâlois (ainsi est né le pilier 2) (Figure 32). Un troisième pilier est chargé d'accroître la transparence des institutions financières, non plus seulement vis-à-vis du régulateur mais vis-à-vis du marché afin notamment de faciliter le travail des agences de notation d'actifs et de pousser à l'autorégulation. Bâle 2 a été construit de sorte à intégrer davantage de flexibilité et de précision dans ses exigences, les rendant finalement plus organiques et à même de favoriser l'essor de l'activité économique intermédiée. Mais cela a également exposé les acteurs aux manipulations et collusions entre régulateurs, examinateurs externes et entités régulées (Tirole, 2016). Ce cadre aurait pu fonctionner si nous n'avions pas été en présence des externalités systémiques que nous avons évoquées plus haut.

Les piliers réglementaires de Bâle 3 (Figure 32) : Face à sa responsabilité dans la crise financière, le système bancaire et financier européen a été soumis à de nouvelles réformes et un renforcement de sa régulation financière et prudentielle. Le cadre Bâle 3 a été adopté en novembre 2010 puis transposé au niveau de l'UE par une directive (la Directive 2013/36/EU communément appelée CRD VI pour *Capital Requirements Directive*) et son règlement (Règlement (EU) 575/2013 du 26 juin 2013, aussi appelé CRR pour *Capital Requirements Regulation*). Les institutions bancaires doivent d'ici le 1^{er} janvier 2019, se plier à des exigences durcies notamment sur les points suivants :

- Un ratio de solvabilité plus élevé de 12% des actifs pondérés du risque ;
- Un ratio de levier qui limite la part des actifs qui sont financés par la dette ;
- Un ratio de liquidité qui impose aux banques de conserver un certain volume d'actifs liquides à leur bilan ; et
- Un mécanisme de résolution qui couvrirait en interne les pertes d'une éventuelle nouvelle crise bancaire (nous parlons d'un «*bail in* » en l'opposant au «*bail out* », sauvetage par les Etats dont ont bénéficié certaines banques lors de la crise de 2008).

FIGURE 32. LES TROIS PILIERS DE LA REGLEMENTATION BALOISE



SOURCES : AUTEUR

5.1.2. La réglementation macroprudentielle

Avant la crise financière de 2008, les autorités de régulation étaient uniquement concentrées sur la résilience des institutions financières à titre individuel en imposant des exigences de capital minimum à détenir en fonction des actifs au bilan (actifs auxquels est affectée une pondération en fonction de leur profil de risque à partir des Accords de Bâle 2). Ce garde-fou microprudentiel (imposé aux institutions selon leur prise de risque individuelle) part de l'hypothèse que si les institutions sont prudentes et solides individuellement, alors l'ensemble du système financier est solide. Dans ce cadre, les risques macroéconomiques sont intégrés et pris en compte dans les arbitrages individuels (ils seraient alors valorisés à leur juste prix/coût). La crise est venue exploser ce « défaut de composition » (Brunnermeier et al., 2009) et creuser le fossé qui pouvait exister entre les arbitrages individuels et l'optimum collectif. Ce fossé est né de l'incapacité des agents à intégrer et corriger par eux-mêmes des déséquilibres financiers (phénomènes de bulle, vulnérabilité liée à l'utilisation de produits financiers trop complexes ou incapacité d'absorber des chocs) de par la présence de plusieurs défaillances de marché. Celles de la dernière crise financière ont été identifiées : les banques n'ont pas su absorber les chocs résultant des phases d'assèchement du crédit interbancaire (*credit crunch*), de l'explosion des « ventes au rabais » (ou *fire sale*) d'actifs et de la présence d'un aléa moral créée par la taille ou le réseau démesuré de certains établissements leur procurant un sauf-conduit implicite à la prise de risque (syndrome du *Too big to fail*).

Afin de corriger les déséquilibres financiers qui ne peuvent l'être au niveau individuel, la mobilisation d'autres mesures, plus macroéconomiques sont nécessaires pour obtenir un équilibre de Pareto (Hellmann, Murdock, et Stiglitz, 2000). Elles agissent sur une double dimension temporelle et structurelle. Les autorités de régulation ont développé un volet macroprudentiel dont les politiques sont discutées et négociées au niveau international par des plateformes règlementaires que sont le FSB, la BRI, le G20 et le FMI. La mise en place et la mesure d'instruments spécifiques incombent en premier lieu aux banques centrales qui opèrent via des organismes dédiés, l'ESRB⁹² (*European Systemic Risk Board*) pour l'Union européenne et le FSOC (*Financial Stability Oversight Council*) aux Etats-Unis.

5.2. Internaliser les risques climatiques dans le cadre prudentiel : enjeux pratiques

La France, et son industrie bancaire, font office de laboratoire précurseur mondial de la mise en place d'un cadre règlementaire qui intègre les enjeux climatiques à son agenda et à ses objectifs. La disposition V de l'article 173⁹³ de la LTECV a pour objet de sensibiliser dans un premier temps, puis d'intégrer le secteur bancaire dans la prise en compte des enjeux climatiques à court et moyen terme dans la conduite de leur activité, à commencer par la gestion des risques. Une première étape de l'application de cette disposition se concrétise par la publication d'un rapport élaboré par le Trésor, avec le concours de la DG Climat, l'autorité de contrôle prudentielle et de résolution (ACPR), la Banque de France et l'ONERC – Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique⁹⁴.

⁹² Créé en 2010, l'ESRB est un organisme indépendant mais rattaché par une structure de clique à la Banque Centrale Européenne, aux autorités prudentielles des états européennes (EBA, EIOPA, ESMA), celles des états membres (AMF, ACPR et HCSF pour le cas de la France) et à la Commission Européenne.

⁹³ Art 173-V.-A.-Après le mot : « liquidité », la fin du deuxième alinéa de l'article L. 511-41-1 B du code monétaire et financier est ainsi rédigée : « **le risque de levier excessif ainsi que les risques mis en évidence dans le cadre de tests de résistance régulièrement mis en œuvre.** »

B.-Le Gouvernement remet au Parlement, avant le 31 décembre 2016, un rapport sur la **mise en œuvre d'un scénario de tests de résistance réguliers représentatifs des risques associés au changement climatique.**

⁹⁴ Créé par la loi du 19 février 2001, l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, en France métropolitaine et d'outre-mer, matérialise la volonté du Parlement et du Gouvernement d'intégrer les effets du changement climatique dans les politiques publiques environnementales. Rattaché depuis 2008 à la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), au sein du ministère en charge de l'Environnement, l'ONERC coordonne la politique nationale d'adaptation au changement climatique.

Aux côtés du ministère des Affaires étrangères et du Développement international, de l'Agence française de développement (AFD) et des Régions françaises concernées, l'Observatoire apporte son expertise aux projets de coopération régionaux sur les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation. Il contribue ainsi au dialogue international sur le changement climatique. À partir de 2017, les grandes orientations de l'action de l'ONERC sont définies par le Conseil national de la transition écologique

Le rapport, publié le 17 février 2017⁹⁵, est une première publication ouverte, appelant à la contribution des parties prenantes (acteurs de place du secteur bancaire) mais également du monde académique et des ONG (les propositions de commentaires et de remarques sont ouvertes à tous). La compilation finale de ce rapport fera l'objet d'une diffusion à destination des autorités de régulation françaises (dans la poursuite de la mise en œuvre de l'Article 173) mais également à l'international : la publication et les développements sont inscrits dans l'agenda du G20. La suite de cette section est le résultat des recherches effectuées et des échanges menés pour constituer la contribution des acteurs du secteur bancaire.

5.2.1. Enjeux conceptuels

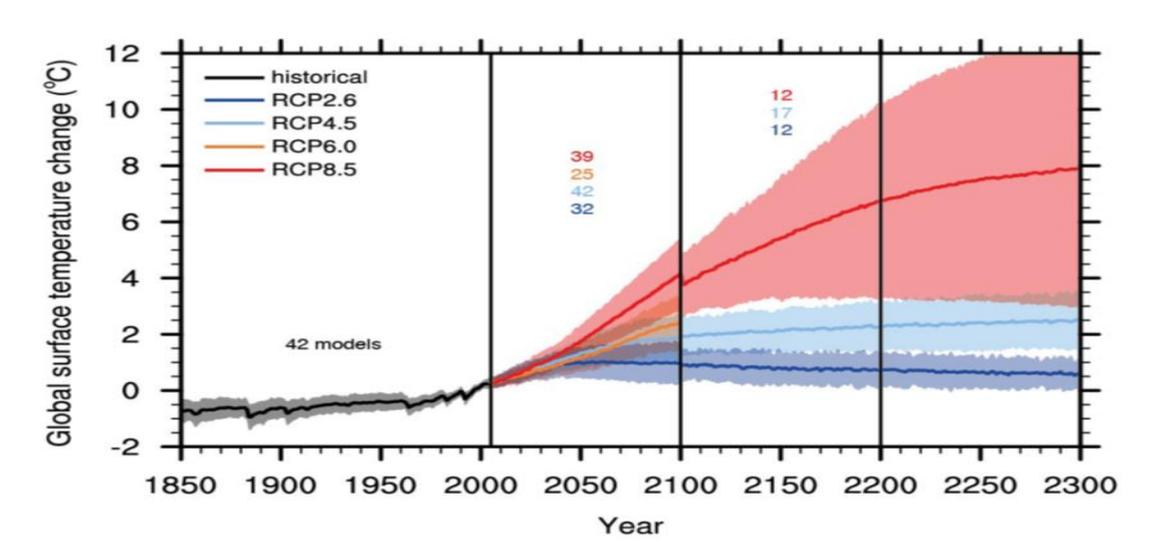
L'objectif du régulateur est ici de pousser le secteur bancaire à s'appropriier les enjeux de la prise en compte des risques climatiques afin que celui-ci sorte de l'apathie faussement établie que d'une part, les risques climatiques se matérialisent à un horizon trop lointain et trop incertain pour être intégrés dans la pratique de gestion des risques et que d'autre part, les risques climatiques sont avant tout des risques physiques qui concernent *prima facie* les assureurs et une dimension de risques purement opérationnels.

Une fois que les acteurs financiers et bancaires ont pris en compte ces enjeux, la question de la mesure des risques et des modalités de leur internalisation impose de déjouer plusieurs difficultés :

- L'imbrication et l'articulation des différents risques identifiés (entre risques climatiques physiques ou de transition) qui impose de partir d'un postulat de départ qu'il n'existe pas de situation « sans risques ».
- La poursuite des activités dans une optique de « *business as usual* » (correspondant au scénario RCP 8,5 autrement dit à un réchauffement climatique irréversible de plus de 4°) entraîne l'explosion des risques climatiques physiques (Figure 33).
- L'adoption d'une trajectoire engagée sur une transition énergétique bas-carbone réduit les risques climatiques physiques mais expose les actifs qui ne sont pas adaptés à ce mode de fonctionnement décarboné à des risques de transition (Figure 34).

⁹⁵ http://www.tresor.economie.gouv.fr/15823_le-secteur-bancaire-face-au-changement-climatique

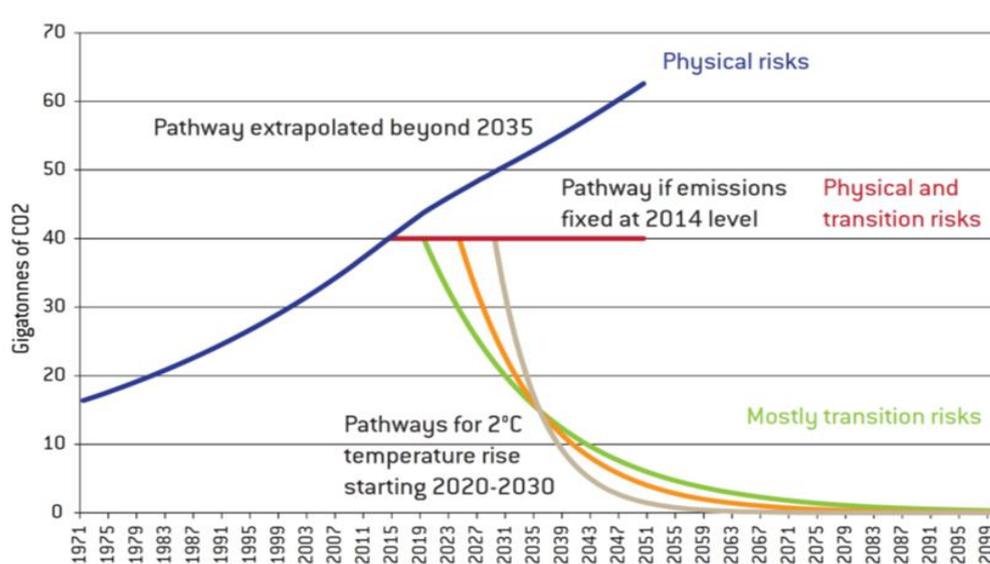
FIGURE 33. INTERVALLES DE REALISATION DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE SELON LES TRAJECTOIRES D'EMISSIONS DE GES DU GIEC



SOURCE : KING ET AL. (2015)

Ces risques de transition sont d'autant plus présents que la trajectoire est tardive et brutale. Une trajectoire optant pour la stabilisation des émissions à leur flux annuel enregistré en 2014 expose les actifs à la fois à des risques climatiques physiques et à des risques de transition. Une transition progressive et graduelle est en revanche censée permettre aux économies de procéder à la transformation de leur stock de capital sans dévaluation brutale et permet également de favoriser un progrès technique et technologique suffisant pour lisser la courbe de coût des technologies bas carbone et maximiser les gains de productivité (produire autant avec moins de facteurs de production émetteurs de GES). La Figure 34 montre l'écoulement du budget carbone en fonction des trajectoires de transition empruntées (UK PRA, 2015). On constate que plus la transition énergétique opère tardivement plus la trajectoire de réduction des émissions mondiales est abrupte. Une transition amorcée en 2020 (ligne verte) implique un rythme de réduction annuel des émissions de carbone de 6 % par an. Une transition amorcée en 2030 impose un rythme de décarbonation de 14 % par an (ligne bleue). Autrement dit, plus la pente est importante, plus le coût marginal de chaque unité de CO₂ réduite est élevé. Si les économies sont forcées de revoir leur mode de fonctionnement de manière brutale et d'opter pour une transition énergétique tardive mais rapide, les acteurs économiques s'exposent en plus à des risques de transitions exacerbés et une plus forte corrélation entre risques physiques et risques de transition. Le risque d'éclatement d'une bulle carbone est d'autant plus grand que la trajectoire de transition sera enclenchée de manière brutale et tardive (Schoenmaker et al ; 2015).

FIGURE 34. TRAJECTOIRES D'EMISSION ET RISQUES ASSOCIES



SOURCE : PRUDENTIAL REGULATION AUTHORITY; 2015

Afin d'atteindre ces objectifs, le régulateur doit surmonter les difficultés liées à l'incertitude de la matérialisation des risques climatiques et les mécanismes d'interaction des différentes variables climatiques entre elles et de leur loi de distribution (question des effets de seuils, autocorrélation des risques, et de la probabilité de fréquence et de niveau des valeurs extrêmes).

En outre, l'intégration des risques climatiques dans la problématique bancaire a un caractère inédit, non pas parce qu'il s'agit de risques nouveaux mais parce que leur implication finale sur des risques plus connus (opérationnels, marchés, crédits, liquidité) opère par des mécanismes et des canaux de transmission encore mal appréhendés (risques de premier et de second ordre et rôle de l'interaction entre différents secteurs).

5.2.2. Approche réglementaire : conduite d'un stress test climatique

Afin de prendre en compte les difficultés mentionnées ci-dessus, l'approche privilégiée est celle du test de résistance plutôt que l'imposition d'une charge de capital prudentiel. Cette approche est spécifique au secteur bancaire car les entreprises et investisseurs sont soumis à une obligation de divulgation et de transparence (dispositions III et IV pour les entreprises cotées et disposition VI pour les investisseurs institutionnels et les gestionnaires de fonds⁹⁶). Elle se rapproche des exigences de *reporting* et des exercices de stress tests réglementaires menés auprès des banques

⁹⁶ La disposition VI de l'article 173 LTECV étend aux investisseurs institutionnels (mutuelles, gestionnaires de fonds, institutions de prévoyance, ...) l'obligation de communiquer sur le risque climatique de leurs portefeuilles, d'évaluer la part verte de leurs investissements et de définir leur stratégie bas-carbone. Et ce, dès l'exercice 2016.

par l'EBA (*European Banking Authority*). Toutefois, l'élaboration d'un stress test climatique va être différente de celle d'un stress test réglementaire usuel et ce en trois points majeurs :

- Elargissement de l'horizon temporel de 2 ans à 5 ans ;
- Mise en place de scénarios spécifiques communs à toutes les entités (scénarios climatiques, de transition, macroéconomiques et financiers) ;
- Objectif axé sur une obligation de moyen (développer les méthodes et les données nécessaires à l'établissement de l'exposition) plutôt qu'une obligation de résultat (prévue dans le cadre de l'EBA par une divulgation publique).

L'élaboration de scénarios communs (à toutes les entités testées) et transversaux (avec l'implication de plusieurs familles d'institutions notamment banques et assureurs) est indispensable pour maintenir la bonne cohérence et la comparabilité des expositions des différents établissements de crédit. La traduction de ces scénarios sur l'exposition spécifique à chaque banque doit être cependant réalisée en interne par chaque entité car elle répond d'une approche plus microéconomique et appelle à des données qualitatives concernant son propre portefeuille de crédit. Une première étape indispensable est d'établir une vision claire de l'exposition spécifique des banques aux enjeux climatiques et à ses mécanismes de premier et de second ordre tels que définis dans la section 3.1.3. Un approfondissement des connaissances doit être envisagé dans un second temps (si des fragilités sont décelées) sur la substituabilité ex-post du capital concerné par ces risques, autrement dit, l'adaptabilité des agents de l'économie réelle à un choc climatique ou à une transition énergétique brutale.

Quel type de scénario envisager ? On a vu plus haut que les travaux menés pour construire des scénarios de synthèse climatique et macroéconomique sont encore en phase de calibrage et que leur application aux mécanismes et à la structure du bilan bancaire n'est encore pas ou très peu exploitée. Pour être mis en place rapidement, un stress test climatique à l'échelle bancaire doit s'inscrire davantage dans une approche à première vue décontextualisée et visant à établir un état des fragilités du secteur à des chocs dont les voies de réalisation sont encore difficiles à identifier. D'une part parce que la matérialisation complète des risques intervient dans une temporalité plus longue. Il est difficile de faire perdurer des scénarios économiques robustes sur le long terme. Et un horizon temporel long nécessite une hypothèse forte sur le taux d'actualisation à adopter et dont le choix fait drastiquement varier les estimations de valeur actualisées⁹⁷ (Stern, 2006 ; Interagency

⁹⁷ Le choix du taux d'actualisation des courbes d'abattement à *la Nordhaus*, destinées à établir la valeur sociale du carbone font l'objet de vifs débats académiques. Le choix successif d'un taux d'actualisation plus ou moins élevés répondant conduisent à un intervalle d'ordre de grandeur très large quant au montant optimal de la valeur carbone estimée successivement par le modèles DICE (11\$ la

Working Group, 2015⁹⁸ ; Nordhaus, 2011). D'autre part parce que les mécanismes de transmission de ces risques dans la sphère économique et financière sont encore très incertains et peu maîtrisables encore du point de vue du modélisateur.

5.2.3. Le rôle des superviseurs dans la prise en compte d'un risque climatique systémique

Parce que les institutions financières individuelles⁹⁹ sont difficilement en mesure de prendre en compte les externalités qui les conduisent à prendre des risques qui engagent non pas leur propre activité, mais la stabilité du système, la lutte contre le risque systémique prend la forme de politiques macroprudentielles, coordonnées par une instance de régulation dédiée. Les politiques macroprudentielles visent à corriger les déséquilibres financiers qui, du fait de l'existence de défaillances de marché, ne sont pas prises en charge dans les arbitrages individuels privés. Car ils sont sources d'externalités négatives, l'identification, la mesure et les potentielles actions d'internalisation d'un risque climatique systémique vont devoir également s'inscrire dans le champ macroprudentiel et entrer dans l'agenda des régulateurs.

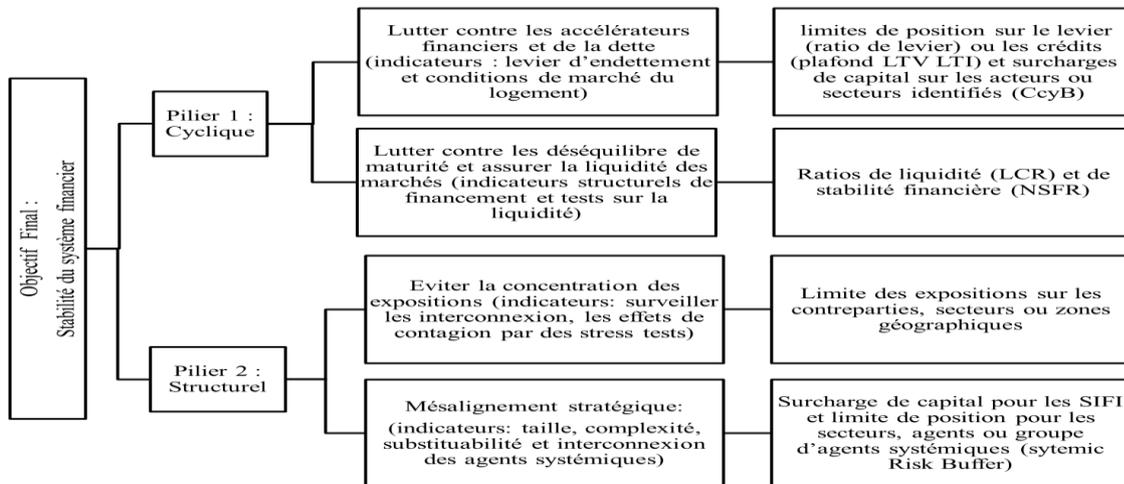
Jusqu'à présent, peu de démarches ont été réalisées dans ce sens. On peut toutefois noter l'impulsion provenant des travaux du CISL de l'UNEP-Finance Initiative, du *Sustainable Finance Lab* et du CEPII (Aglietta et Espagne, 2016a, 2016b), poursuivie dans de plus hautes sphères au sein du Green Finance Study Group, groupe de travail affilié au G20 et des comités scientifiques des institutions prudentielles (PRA, ESRB) et des banques centrales anglaise et chinoise (*Bank of England*, ICBC). Les politiques macroprudentielles ont un objectif principal : la stabilité du système financier. Pour l'atteindre, cet objectif ultime peut se décomposer en plusieurs objectifs intermédiaires qui sont (i) sur le volet temporel de limiter les effets d'accélérateurs financiers et de levier et de garantir l'accès à la liquidité sur les marchés ; et (ii) sur le volet structurel de limiter la concentration des expositions et d'éviter les divergences stratégiques des différents acteurs jugés d'importance systémique (Figure 35). L'intégration des risques climatiques systémique dans le cadre macroprudentiel nécessite l'adaptation des outils prudentiels existants et le développement de nouveaux outils (Figure 36).

tonne de CO₂) (Nordhaus, 2011), le Interagency Working Group utilisant trois types d'IAM (39\$ la tonne) et le modèle PAGE (200\$ la tonne) (Stern, 2006).

⁹⁸ <https://www.epa.gov/climatechange/social-cost-carbon>

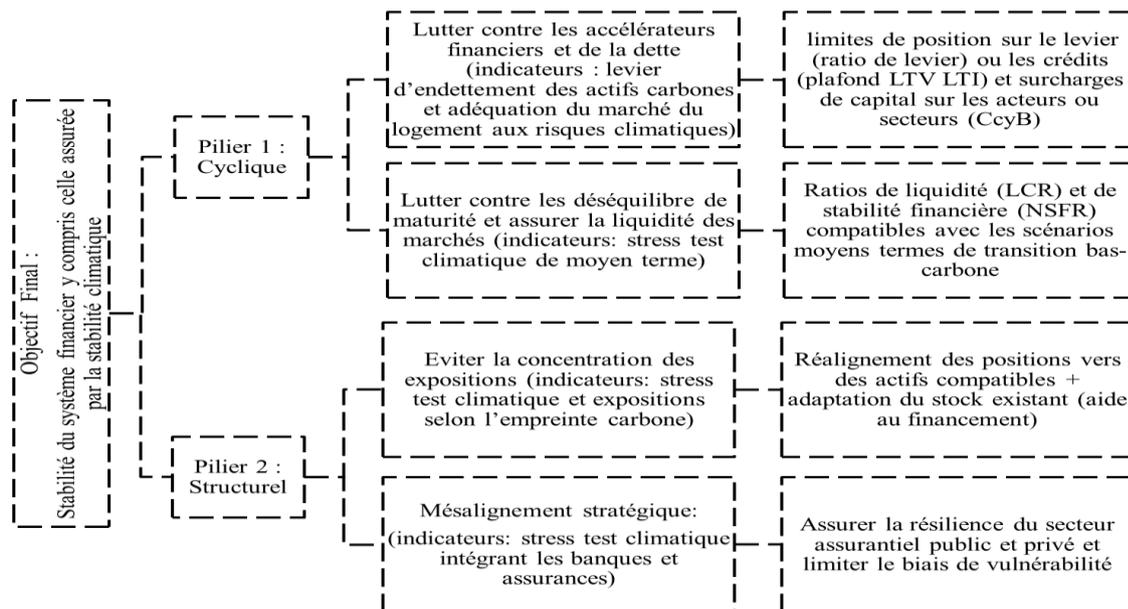
⁹⁹ A l'exception de certains acteurs spécifiques comme les chambres de compensation

FIGURE 35. CADRE MACROPRUDENTIEL EXISTANT (CRR ET CRDIV)



SOURCES : AUTEUR A PARTIR DES TRAVAUX DE L'ESRB

FIGURE 36. ADAPTATION DU CADRE MACROPRUDENTIEL AUX ENJEUX CLIMATIQUES



SOURCES : AUTEUR

On voit que l'intégration des enjeux climatiques dans le secteur financier ne requiert pas tant des exigences supplémentaires en capital ou des limites de positions mais plutôt l'adaptation des ratios existants à l'empreinte carbone des agents, secteurs et zones géographiques concernés par les risques climatiques. Afin de développer des indicateurs de risque pertinents, il faut améliorer l'information sur l'empreinte carbone des entreprises non financières et des ménages (tout du moins de leur logement) et rendre plus fréquent l'état de l'exposition du système financier aux actifs sujets aux risques climatiques élevés au travers de stress tests dédiés.

6. Conclusion

La valeur sociale du carbone qui permet d'intégrer dans les arbitrages économiques le coût réel imputé à l'utilisation du bien commun environnemental, symbolisé par les émissions anthropiques de CO₂ rejetées dans l'atmosphère, peut-elle être générée sur les marchés financiers et si oui, sous quelle forme ? La valeur sociale du carbone a longtemps été perçue comme un signal prix explicite exogène prenant la forme d'une taxe, ou d'un permis d'émission. Le récent Accord de Paris et les efforts nationaux notamment Français et Européens qui l'accompagnent privilégient pourtant l'intégration de la valeur sociale du carbone par un signal prix implicite, prenant la forme d'une exigence de transparence et de l'obligation de rendre compte de l'empreinte et des stratégies bas carbone des entreprises côtés et des institutions financières (Task force on Climate related Financial Disclosure ou TCFD et Article 173 disposition III, IV et VI de la Loi de Transition Energétique pour une Croissance Verte ou LTECV). A noter que le marché des obligations vertes (*Green Bonds*), en croissance exponentielle depuis son émergence en 2009 est une forme de prix implicite du carbone qui ne nécessite aucune intervention publique et est un présage optimiste de l'intégration complète des enjeux climatiques par le secteur privé (Takada, H. et al., 2017).

Si ces efforts sont collectifs et soutenus à l'échelle mondiale, l'intégration des enjeux climatiques dans l'agenda financier privé favorise une nouvelle manière d'appréhender la dépendance des systèmes énergétiques, économiques et sociétaux aux actifs carbonés au travers de l'exposition des institutions qui les financent et les risques qu'elles encourent si elles ne revoient pas leur stratégie. Il y a donc une voie pour créer une valeur sociale du carbone au sein même des marchés financiers sous la forme d'une prime de risque. La prise en compte de ces risques peut être une opportunité de générer un signal prix du carbone explicite, endogène aux marchés financiers, prenant la forme d'une prime de risque.

Cette présente thèse retient trois types de risques économiques associés au changement climatique : les risques physiques, les risques de transition et les risques fiduciaires et réputationnels (« *liability risks* »). La non-prise en compte de cette nouvelle famille de risque dans les arbitrages des acteurs du système financier met en péril la solvabilité des acteurs économiques et financiers au travers de trois risques financiers finaux : (i) les risques spécifiques qui se matérialisent par un impact direct sur la valeur des actifs détenus par les acteurs financiers (risques de marché ou risques opérationnels), ou indirect par un impact sur les acteurs financés et intermédiés par le secteur financier (risques de crédit) ; (ii) les risques systématiques qui se traduisent par un impact macroéconomique local ou global (érosion du PIB) (iii) le risque systémique, enfin, qui se matérialise par un choc non maîtrisé sur l'ensemble du système financier.

Lorsqu'un risque ne parvient pas à être internalisé par les agents d'un marché, il met en péril l'ensemble du système, on le qualifie de risque climatique systémique. C'est alors au régulateur de proposer des solutions, imposer des limites de position ou de taille de marché afin d'internaliser ce type de risque dans l'arbitrage financier collectif. Dans le cadre des risques climatiques, on voit que les mécanismes macroprudentiels existants peuvent apporter certaines solutions mais qu'une étape supplémentaire doit être franchie, celle de reconnaître l'empreinte carbone des actifs soumis aux ratios réglementaires existants afin qu'une véritable incitation à mitiger le risque climatique global soit mise en place.

Comment et en quoi les différentes institutions financières sont impactées par ces risques climatiques ? Investisseurs, assureurs, banquiers ne sont pas impactés de la même manière aux risques climatiques. Ces derniers se propagent de manière directe et indirecte par des effets de second tour favorisant des effets de contagions et d'interconnexions qui sont facteurs de risque systémique. Les différentes institutions du paysage financier ne sont pas exposées de la même manière aux risques climatiques car il existe notamment des différences fondamentales entre les banques et les autres intermédiaires financiers (Goodhart et al. 1988). Ces dernières, à la différence des investisseurs et des assureurs, conservent à leur bilan des actifs non liquides et non négociables. Elles ont par conséquent un prisme différent en termes de gestion du risque. Elles sont autant plus impactées par les actifs sensibles au risque climatique qu'il s'agit d'actif de long terme et d'un stock de crédits souscrits par des agents qui seraient plutôt victimes d'un choc climatique qu'acteurs (crédits immobiliers, PME et ETI exposés et vulnérables).

Comment favoriser, accompagner, convertir, cette nouvelle valorisation qui permet l'intégration des problématiques climatiques au cœur des rouages financiers et de renforcer leur participation de ses diverses institutions dont le rôle est essentiel à la transition énergétique ? Cette nouvelle forme de valorisation du carbone peut être un levier de transition énergétique majeur s'il s'accompagne des mécanismes de prix du carbone implicites évoqués plus haut, mais également d'un cadre institutionnel et réglementaire fort et impliqué, lui-même dans la lutte contre le réchauffement climatique. Pour cela, il faut des politiques publiques alignées avec les objectifs de l'Accord de Paris. Il faut également corriger le biais réglementaire existant qui pénalise (ou ne favorise pas), par une neutralité obsolète, les investissements et financements bas carbone de la part des intermédiaires financiers.

La politique monétaire est un levier intéressant pour mobiliser les financements de grande ampleur, à condition de lui donner les marges de manœuvre suffisantes. Cela implique d'intégrer

des objectifs de croissance à la fonction objectif de la BCE, jusqu'ici construite autour d'un mandat uniquement dédié à la stabilité des prix. L'acronyme SUMO (*Smart Unconventional Monetary policies*) recouvre les différents instruments qui permettraient de réorienter la finance grâce aux banques centrales. La Chine donne un exemple inattendu mais intéressant d'intégration de la question financière dans sa propre transition énergétique, ce qui n'induit pas de jugement de valeur sur l'ensemble de la politique énergétique du pays qui consomme en 2015 la moitié du charbon mondial (BP Statistical Review 2016), qui est un sujet en soi. Les investissements nécessaires à la réalisation du 13^{ème} plan sur le plan environnemental sont estimés à près de 350 milliards de dollars. Dès 2014, le gouvernement chinois a mis en place une commission (*Green Finance Task Force*) chargée de faire des recommandations en matière d'incitations dans les projets ENR. Ces dernières intègrent un système de bonus-malus permettant d'augmenter la rentabilité des projets ENR¹⁰⁰. Plus globalement la Chine va proposer une infrastructure globale favorable à l'investissement vert : la création d'institutions financières spécialisées dans les projets ENR, une politique fiscale et financière (prêts subventionnés, création de taxes créant de la distorsion en faveur des ENR...), le développement des marchés de CO₂ et la création d'un système de rating vert (indice boursier environnemental...) et, enfin, un système d'assurance obligatoire pour mettre en exergue les dommages des projets polluants. Cet arsenal a le mérite d'intégrer différents outils économiques et cherche à intégrer la spécificité des ENR à travers la création d'une institution spécialisée. D'un point de vue strictement européen, la Commission prévoit d'ores et déjà des outils de relance de l'économie orientée vers une transition énergétique compatible 2° avec le Plan Juncker. Mais cela implique de définir le périmètre d'intervention et de pouvoir trouver des outils pour mesurer l'activité « verte » des activités bancaires et financières et sélectionner les stratégies d'investissement et de réallocation des bilans les plus efficaces pour réduire les risques climatiques.

Afin d'accompagner les institutions financières dans une démarche vertueuse de prise en compte des risques climatique à leur bilan, il faut créer des leviers d'incitation à l'investissement et au financement décarboné et durable. Dans cette optique, il est souhaitable d'utiliser à bon escient le cadre réglementaire de ces derniers. Une incitation efficace de la part des pouvoirs publics pourrait être d'intégrer des considérations d'ordre climatique dans la conduite générale de la réglementation financière et bancaire. Cela peut être à travers une obligation d'internalisation des mesures du risque climatiques par la mise en place de stress tests climatiques (Art 173 disposition V de la LTECV), accompagnée de l'adaptation des outils d'exigence prudentielles à la lumière de l'acquis d'actifs et/ou de stratégies de protection contre les risques climatiques. Ce dernier point

¹⁰⁰ Une proposition similaire est portée en France par la Fédération Bancaire Française sous l'appellation *Green Supporting Factor*

est important car il met en lumière un biais possiblement dommageable pour la création d'une prime de risque climatique au sein du cadre réglementaire actuel. Le cadre réglementaire existant est en fait d'ores et déjà biaisé s'il n'intègre pas ces considérations de risques climatiques. Les exigences prudentielles dans le secteur du logement sont un exemple parlant pour expliquer cette subtilité.

Pour le financement d'un bien immobilier, les prêteurs s'appuient sur la valeur du logement (approche LTV *Loan to Value*) ou sur la capacité des ménages à générer un revenu (indicateur de solvabilité LTI ou *Loan to Income*). Les banques qui octroient un crédit selon l'une ou l'autre approche sont exposées d'une différente manière aux risques climatiques induits. La première approche est plus sensible aux risques climatiques physiques indirects liés à la variation de la qualité de la couverture assurantielle et son impact sur le prix des logements. La seconde est davantage sensible aux risques indirects liés à la dégradation de l'environnement macroéconomique et la hausse des prix de l'énergie qui impactent les capacités de remboursement du ménage au travers de leur revenus disponible ou de la hausse de leurs dépenses contraintes. La seconde méthode semble finalement plus protectrice des effets de contagions entre assureurs et banques via la volatilité des prix du logement et leur corrélation avec la qualité de la couverture assurantielle. Dans les dernières négociations réglementaires du comité de Bâle en vue de la mise en application de l'accord Bâle 3, les régulateurs favorisent l'approche de la « Loan to Value » (LTV), privilégiant des modèles d'évaluation externes et standardisée qui permet la surveillance et la comparaison entre établissements. L'hypothèse est qu'elle apporte une solution supposément plus prudente pour le secteur du logement et limitent les comportements à risque des banques. Ce changement d'approche peut, dans le même temps fondamentalement modifier la manière dont les banques opèrent sur ce marché et la valeur accordée au collatéral autrement dit, la valeur du logement, favorisant comme on l'a vu une exposition à un risque climatique systémique.

L'enjeu pour les années à venir est double. Il faut tout d'abord rendre compte du maillage complexe de ces risques dans la valorisation des portefeuilles existants : qui origine le risque climatique, qui l'orchestre et qui le subit. Il faut ensuite, afin de satisfaire l'objectif de l'Article 2 de l'Accord de Paris, trouver des outils de sélection et de fléchage des projets compatibles avec une trajectoire de réchauffement climatique limitée à 2° («2° compatibles»). La comptabilité carbone est un enjeu décisif pour le régulateur s'il veut intégrer des considérations environnementales dans ses objectifs de stabilité du système financier. D'autant que si elle devient une source de contrainte réglementaire, ou même au contraire d'allègement (octroi d'exemptions ou d'exigences moindres), alors cette comptabilité devient stratégique pour les acteurs qui s'y

soumettent. Pour cela, ils ont besoin d'un signal clair de la part des autorités de régulation financière et bancaire sur le fait que la compatibilité carbone des investissements et des financements réalisés sera prise en compte comme étant réducteur du risque climatique systémique dont elles devront rendre compte et encouragée en tant que telle. Finalement, la mise en pratique d'une volonté de transition appelle la recherche d'un réalisme climatique de la part des autorités de régulation tout comme de celle de ses entités régulées.

7. References

- Acemoglu, Daron, Philippe Aghion, Leonardo Bursztyn, and David Hemous. 2012. 'The Environment and Directed Technical Change'. *American Economic Review* 102 (1): 131–66. doi:10.1257/aer.102.1.131.
- Acharya, Viral V. 2009. 'A Theory of Systemic Risk and Design of Prudential Bank Regulation'. *Journal of Financial Stability* 5 (3): 224–55. doi:10.1016/j.jfs.2009.02.001.
- Aglietta, Michel, and Etienne Espagne. 2016. 'Climate and Finance Systemic Risks, More than an Analogy? The Climate Fragility Hypothesis'. *CEPII*. http://www.cepii.fr/PDF_PUB/wp/2016/wp2016-10.pdf.
- . 2016. 'Fighting Climate Systemic Risk: From Carbon Pricing to Monetary Instruments'. In *Chaire Energie et Prospérité*. Accessed October 21. <http://www.chair-energy-prosperity.org/event/organisation-dun-semester-thematique-financement-de-transition-energetique-regulations-innovations-financieres-oct-2016-mai-2017/>.
- Aglietta, Michel, Jean-Charles Hourcade, Carlo Jaeger, and Baptiste Perrissin Fabert. 2015. 'Financing Transition in an Adverse Context: Climate Finance beyond Carbon Finance'. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics* 15 (4): 403–20. doi:10.1007/s10784-015-9298-1.
- Aglietta, Michel, and Sandra Rigot. 2014. 'Investisseurs à long terme, régulation financière et croissance soutenable'. *Revue d'économie financière*, no. 108 (March): 189–200.
- Aglietta, Michel, and Natacha Valla. 2016. 'Taux d'Intérêt Négatifs : Choix Sociétal Ou Stagnation Séculaire', Panorama du CEPII, . http://www.cepii.fr/PDF_PUB/panorama/pa2016-01.pdf.
- All. 2017. 'Revue de L'énergie (La) - N° 629, Janvier-Février 2016'. *Technip*. Accessed April 25. <http://www.editionstechnip.com/fr/catalogue-detail/2189/revue-de-l-energie-la-n-629-janvier-fevrier-2016.html>.
- Allen, Myles R., David J. Frame, Chris Huntingford, Chris D. Jones, Jason A. Lowe, Malte Meinshausen, and Nicolai Meinshausen. 2009. 'Warming Caused by Cumulative Carbon Emissions towards the Trillionth Tonne'. *Nature* 458 (7242): 1163–66. doi:10.1038/nature08019.
- Andersson, Mats, Patrick Bolton, and Frédéric Samama. 2016. 'Hedging Climate Risk'. *Financial Analysts Journal* 72 (3): 13–32. doi:10.2469/faj.v72.n3.4.
- Andrew Voysey, and Nina Andreeva. 2016. 'Environmental Risk Analysis by Financial Institutions – a Review of Global Practice'. An input paper for the G20 Green Finance Study Group UNEP-2016. UNEP Inquiry. CISL Cambridge Institute for Sustainability Leadership.
- Arrondel, Luc. n.d. 'BdF_arrondel_immobilier_actifsfi_eurosysteme_RDB-19.pdf'.
- Arrondel, Luc, Laura Bartiloro, Pirmin Fessler, Peter Lindner, Thomas Y. Mathä, Cristiana Rampazzi, Frederique Savignac, Tobias Schmidt, Martin Schürz, and Philip Vermeulen. 2014. 'How Do

- Households Allocate Their Assets? Stylised Facts from the Eurosystem Household Finance and Consumption Survey'. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2490969.
- Balint, Tomas, Francesco Lamperti, Antoine Mandel, Mauro Napoletano, Andrea Roventini, and Alessandro Sapio. 2016. 'Complexity and the Economics of Climate Change: A Survey and a Look Forward'. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2807571.
- Bals, Christoph, David Eckstein, Sönke Kreft, Jakob Thomä, Morten Rossé, Ian Cochran, And Mariana Deheza. 2015. 'Developing 2°C-Compatible Investment Criteria'. German Watch Report. German Watch, New Climate Institute, 2°Investing Initiative. <https://germanwatch.org/en/download/13444.pdf>.
- Batten, Sandra, Rhiannon Sowerbutts, and Misa Tanaka. 2016. 'Let's Talk About the Weather: The Impact Of Climate Change on Central Banks'. Bank of England Staff Working Paper. http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2783753.
- Battiston, Stefano, Antoine Mandel, Irene Monasterolo, Franziska Schuetze, and Gabriele Visentin. 2016. 'A Climate Stress-Test of the Financial System'. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2726076.
- Bénabou, Roland. 2009. 'Groupthink: Collective Delusions in Organizations and Markets'. Working Paper 14764. National Bureau of Economic Research. doi:10.3386/w14764.
- Benoit, Sylvain, Jean-Edouard Colliard, Christophe Hurlin, and Christophe Pérignon. 2015. 'Where the Risks Lie: A Survey on Systemic Risk', November. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01142014/document>.
- Berdin, Elia, and Matteo Sottocornola. 2015. 'Assessing Systemic Risk of the European Insurance Industry'. EIOPA Working Document. http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2701821.
- Billio, Monica, Mila Getmansky, Andrew W. Lo, and Lorian Pelizzon. 2012. 'Econometric Measures of Connectedness and Systemic Risk in the Finance and Insurance Sectors'. *Journal of Financial Economics* 104 (3): 535–59. doi:10.1016/j.jfineco.2011.12.010.
- Boissinot, Jean, Doryane Huber, Isabelle Camilier-Cortial, and Gildas Lame. 2016. 'Le Secteur Financier Face À La Transition Vers Une Économie Bas-Carbone Résiliente Au Changement Climatique'. *Economie & Prévision*, no. 1: 197–206.
- Bond, Tami C., Ekta Bhardwaj, Rong Dong, Rahil Jogani, Soonkyu Jung, Christoph Roden, David G. Streets, and Nina M. Trautmann. 2007. 'Historical Emissions of Black and Organic Carbon Aerosol from Energy-Related Combustion, 1850-2000: HISTORICAL BC/OC EMISSIONS'. *Global Biogeochemical Cycles* 21 (2): n/a-n/a. doi:10.1029/2006GB002840.
- Boucher, Christophe, and Michel Boutillier. 2015. *Risque systémique et politiques macro/microprudentielles*. Paris: Presses de Sciences Po.

- Breaking the tragedy of the horizon - climate change and financial stability - speech by Mark Carney / Bank of England*. 2015. Bank of England.
<http://www.bankofengland.co.uk/publications/Pages/speeches/2015/844.aspx>.
- Breton, Morgane Le, and Franck Aggeri. 2015. 'De la comptabilité carbone aux stratégies bas carbone', November, 27–41.
- Brunnermeier, Markus, Andrew Crockett, Charles A. Goodhart, Avinash Persaud, and Hyun Song Shin, eds. 2009. *The Fundamental Principles of Financial Regulation*. Geneva Reports on the World Economy 11. Geneva: ICMB, Internat. Center for Monetary and Banking Studies.
- Caldecott, Ben, Lucas Kruitwagen, Gerard Dericks, Daniel J. Tulloch, Irem Kok, and James Mitchell. 2016. 'Stranded Assets and Thermal Coal: An Analysis of Environment-Related Risk Exposure'. *Stranded Assets Programme, SSEE, University of Oxford*.
http://papers.ssrn.com/sol3/Papers.cfm?abstract_id=2724550.
- Canfin, and Granjean. 2015. 'Financer La Transition Énergétique'. 2268-3798.
<http://odel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=4675&format=print>.
- Carbon Tracker. 2016. 'Wasted Capital and Stranded Assets'. Accessed December 2.
<http://www.carbontracker.org/report/unburnable-carbon-wasted-capital-and-stranded-assets/>.
- Carraro, Carlo, and Domenico Siniscalco. 1993. 'Strategies for the International Protection of the Environment'. *Journal of Public Economics* 52 (3): 309–328.
- CISL-University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership. 2015. 'Unhedgeable Risk How Climate Change Sentiment Impacts Investment'.
- Coeslier, Manuel, Céline Louche, and Jean-François Hétet. 2016. 'On the Relevance of Low-Carbon Stock Indices to Tackle Climate Change'. *Journal of Sustainable Finance & Investment* 6 (4): 247–62. doi:10.1080/20430795.2016.1223471.
- Comerford, David, and Alessandro Spiganti. 2016. 'The Carbon Bubble: Climate Policy in a Fire-Sale Model of Deleveraging', September.
<http://www.bankofengland.co.uk/research/Documents/conferences/cbubbcp.pdf>.
- Convention-Cadre sur les changements climatiques*. 2015.
<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fre/109f.pdf>.
- Covington, Howard. 2015. 'The Value at Risk from Climate Change'. SSRN Scholarly Paper ID 2681035. Rochester, NY: Social Science Research Network.
<https://papers.ssrn.com/abstract=2681035>.
- Criqui, Patrick, and Silvana Mima. 2012. 'European Climate—energy Security Nexus: A Model Based Scenario Analysis'. *Energy Policy, Modeling Transport (Energy) Demand and Policies*, 41 (February): 827–42. doi:10.1016/j.enpol.2011.11.061.
- Dafermos, Yannis, Maria Nikolaidi, and Giorgos Galanis. 2016. 'PKSG'.
<http://www.postkeynesian.net/downloads/working-papers/PKWP1612.pdf>.

- Dasgupta, Dipak, Etienne Espagne, Jean-Charles Hourcade, Irving Minzer, Seyni Nafu, Baptiste Perissin-Fabert, Nick Robins, and Alfredo Sirkis. 2016. 'Did the Paris Agreement Plant the Seeds of a Climate Consistent International Financial Regime?' MITP: Mitigation, Innovation, and Transformation Pathways 243151. Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM). <https://ideas.repec.org/p/ags/feemmi/243151.html>.
- Dewatripont, Mathias, and Jean Tirole. 1994. 'The Prudential Regulation of Banks'. ULB Institutional Repository. ULB -- Université Libre de Bruxelles. http://econpapers.repec.org/paper/ulbulbeco/2013_2f9539.htm.
- Dietz, Simon, Alex Bowen, Charlie Dixon, and Philip Gradwell. 2016. 'Climate Value at Risk of Global Financial Assets'. *Nature Climate Change* advance online publication (April). doi:10.1038/nclimate2972.
- Dietz, Simon, and Nicholas Stern. 2015. 'Endogenous Growth, Convexity of Damage and Climate Risk: How Nordhaus' Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions'. *The Economic Journal* 125 (583): 574–620. doi:10.1111/eoj.12188.
- DONADELLI, M., M. JUPPNER, M. RIEDEL, and C. SCHLAG. 2017. 'How Costly Is Global Warming? Implications for Welfare, Business Cycles, and Asset Prices.' Accessed January 4. https://www.cepweb.org/wp-content/uploads/donadelli_paper.pdf.
- Ekeland, Ivar. 2015. *Le Syndrome de la grenouille: L'économie et le climat*. Éditions Odile Jacob.
- Espagne, Etienne. 2015. 'Les Clubs Climatique et La COP21 : Énemis D'aujourd'hui et Alliés de Demain?' *La Lettre Du CEPPII*. November. <http://www.cepii.fr/CEPII/fr/publications/lettre/abstract.asp?NoDoc=8439>.
- Espagne, Etienne, and Michel Aglietta. 2016. 'Financing Energy and Low-Carbon Investment in Europe: Public Guarantees and the ECB'. In *Handbook of Research on Green Economic Development Initiatives and Strategies*, 132–146. IGI Global.
- Espagne, Étienne, Jean-Charles Hourcade, and Baptiste Perrissin Fabert. 2015. 'La finance au secours du climat ? La Nature entre prix et valeur'. *Natures Sciences Sociétés* Supplément (Supp. 3): 117–21.
- Eyring, Veronika, Ivar S.A. Isaksen, Terje Berntsen, William J. Collins, James J. Corbett, Oyvind Endresen, Roy G. Grainger, Jana Moldanova, Hans Schlager, and David S. Stevenson. 2010. 'Transport Impacts on Atmosphere and Climate: Shipping'. *Atmospheric Environment* 44 (37): 4735–71. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.04.059.
- Fama, Eugene F., and Kenneth R. French. 1993. 'Common Risk Factors in the Returns on Stocks and Bonds'. *Journal of Financial Economics* 33 (1): 3–56. doi:10.1016/0304-405X(93)90023-5.
- Fédération Française des Assureurs. 2015. 'CLIMATE RISKS: IMPACT ON NATURAL HAZARDS INSURANCE BETWEEN NOW AND 2040'. Climate Change and Insurance Study.

- française, Jean Jouzel. 2017. 'Le climat de la France au XXI^e siècle - Volume 4 - Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer'. Rapport public. Accessed February 25. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/144000543/index.shtml>.
- Fusco, Elisa, and Francesco Vidoli. 2015. 'Spatial Stochastic Frontier Models: Instructions for Use'. *Vignette R Package Version 1*. <https://mirror.mdx.ac.uk/R/web/packages/ssfa/vignettes/ssfavignette.pdf>.
- Gatarek, Lukasz, and Søren Johansen. 2016. 'Optimal Hedging with the Cointegrated Vector Autoregressive Model Allowing for Heteroscedastic Errors'. https://www.researchgate.net/profile/Lukasz_Gatarek/publication/307560787_Optimal_hedging_with_the_cointegrated_vector_autoregressive_model_allowing_for_heteroscedastic_errors/links/57c8a30808aefc4af34eca20.pdf.
- Grandjean, Alain, Mireille Martini, Nicolas Hulot, and Pascal Canfin. 2016. *Financer la transition énergétique: mandature 2010-2015 : carbone, climat et argent*. Ivry-sur-Seine: Les Éditions de l'Atelier : Éditions ouvrières.
- Griffin, Paul A., Amy Myers Jaffe, David H. Lont, and Rosa Dominguez-Faus. 2015. 'Science and the Stock Market: Investors' Recognition of Unburnable Carbon'. *Energy Economics* 52 (December): 1–12. doi:10.1016/j.eneco.2015.08.028.
- Guéant, Olivier, Roger Guesnerie, and Jean-Michel Lasry. 2012. 'Ecological Intuition versus Economic "Reason"'. *Journal of Public Economic Theory* 14 (2): 245–72. doi:10.1111/j.1467-9779.2011.01541.x.
- Hache, Emmanuel. 2016. 'L'OPEP, Les Compagnies Internationales, Les Compagnies Nationales : Qui Gouverne La Scène Pétrolière Mondiale ?' *Revue de L'énergie (La)*, no. 629 (Janvier-Février 2016) (March): 11–22.
- Hache, Emmanuel, François Querini, Stéphane Tchong-Minh, and François Bouvard. 2017. 'Recommandations Pratiques Pour L'acv Prospective / Références et Exemples Dans Le Domaine de L'énergie'. Etude SCORE LCA n° 2015-17.
- Hardin, Garrett. 1968. 'The Tragedy of the Commons'. *Science* 162 (3859): 1243–48. doi:10.1126/science.162.3859.1243.
- Hellmann, Thomas F., Kevin C. Murdock, and Joseph E. Stiglitz. 2000. 'Liberalization, Moral Hazard in Banking, and Prudential Regulation: Are Capital Requirements Enough?' *American Economic Review*, 147–165.
- Hong, Harrison, Frank Weikai Li, and Jiangmin Xu. 2016. 'Climate Risks and Market Efficiency'. Working Paper 22890. National Bureau of Economic Research. doi:10.3386/w22890.
- IPCC. 2014. 'Fifth Assessment Report - Synthesis Report'. Synthesis Report AR5. IPCC. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.

- King, David, Arunabha Ghosh, and Daniel Shrag. 2015. 'Climate Change - A Risk Assessment'. Centre for Science and Policy. University Of Cambridge.
<http://centaur.reading.ac.uk/63688/1/climate-change--a-risk-assessment-v11-drought-section.pdf>.
- Knight, Frank H. 2012. *Risk, Uncertainty and Profit*. Courier Corporation.
- Leaton, James, and Ward, Bob. 2013. 'Unburnable Carbon 2013: Wasted Capital and Stranded Assets'. presented at the Carbon Tracker, Grantham Research Institute, LSECarbon Tracker, Grantham Research Institute, LSE.
- Leboulenger, Déborah, and Emmanuel Hache. 2016. 'Y-a-T-Il Un Banquier Pour Sauver Le Climat ?' *Revue de L'énergie (La)*, no. 633 (October).
http://www.larevuedelenergie.com/fr/detail/detail_premier/1/aff/case/tri/dateinv/type/classique/2220/revue-de-l-energie-la-n-633-septembre-octobre-2016.html.
- Lee, David S., David W. Fahey, Piers M. Forster, Peter J. Newton, Ron C.N. Wit, Ling L. Lim, Bethan Owen, and Robert Sausen. 2009. 'Aviation and Global Climate Change in the 21st Century'. *Atmospheric Environment* 43 (22–23): 3520–37. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.04.024.
- Lewis, Mark C., Stéphane Voisin, Sudip Hazra, Samuel Mary, and Robert Walker. 2014. 'Stranded Assets, Fossilised Revenues'. *Energy Transition & Climate Change. Kepler Cheuvreux. April 24*.
<http://www.natural-assets.com/uploads/3/7/7/6/37760505/kepler-report.pdf>.
- Ley, Marius, Tobias Stucki, Martin Woerter, and others. 2016. 'The Impact of Energy Prices on Green Innovation'. *The Energy Journal* 37 (1): 41–75.
- Mai Farid, Michael Keen, Michael Papaioannou, Ian Parry, Catherine Pattillo, Anna Ter-, and Martirosyan, and other IMF Staff. 2016. 'After Paris: Fiscal, Macroeconomic, and Financial Implications of Climate Change'. IMF Staff Discussion Notes.
- McGlade, Christophe, and Paul Ekins. 2015. 'The Geographical Distribution of Fossil Fuels Unused When Limiting Global Warming to 2 °C'. *Nature* 517 (7533): 187–90. doi:10.1038/nature14016.
- Meinshausen, Malte, Nicolai Meinshausen, William Hare, Sarah C. B. Raper, Katja Frieler, Reto Knutti, David J. Frame, and Myles R. Allen. 2009. 'Greenhouse-Gas Emission Targets for Limiting Global Warming to 2 °C'. *Nature* 458 (7242): 1158–62. doi:10.1038/nature08017.
- Moore, John, and Nobuhiro Kiyotaki. 1997. 'Credit Cycles'. SSRN Scholarly Paper ID 3914. Rochester, NY: Social Science Research Network. <http://papers.ssrn.com/abstract=3914>.
- Moslener, Ulf, Jakob Thomä, Beate Sonerud, Christine Grüning, Ian Cochran, Stanislas Dupré, Sean Kidney, Hans Bolscher, Lisa Eichler, and Louis Perroy. 2015. 'Shifting Private Finance towards Climate-Friendly Investments: Policy Options for Mobilising Institutional Investors' Capital for Climate-Friendly Investment'. <http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/handle/minam/1880>.
- 'Natural Catastrophe Losses at Their Highest for Four Years | Munich Re'. 2017. Accessed February 15. <https://www.munichre.com/en/media-relations/publications/press-releases/2017/2017-01-04-press-release/index.html>.

- ‘New Study Estimates Global Warming of 2.5 Centigrade Degrees by 2100 Would Put at Risk Trillions of Dollars of World’s Financial Assets | Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment’. 2016. Accessed July 18.
- Newell, Richard G., Adam B. Jaffe, and Robert N. Stavins. 1999. ‘The Induced Innovation Hypothesis and Energy-Saving Technological Change’. *The Quarterly Journal of Economics* 114 (3): 941–975.
- Nordhaus, W. D. 2010. ‘Economic Aspects of Global Warming in a Post-Copenhagen Environment’. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (26): 11721–26. doi:10.1073/pnas.1005985107.
- Nordhaus, William. 2015. ‘Climate Clubs: Overcoming Free-Riding in International Climate Policy’. *American Economic Review* 105 (4): 1339–70. doi:10.1257/aer.15000001.
- Ostrom, Elinor. 2015. *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Canto Classics. Cambridge, United Kingdom: Cambridge Univ Press.
- Ouzeau, G., M. Déqué, M. Jouini, S. Planton, and R. Vautard. 2014. ‘Le Climat de La France Au XXIe Siècle’. *Rapport de La Direction Générale de L’énergie et Du Climat, Www. Developpement-Durable. Gouv. Fr.* <http://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-22612-onerc-climat-france.pdf>.
- Pachauri, Rajendra K., Myles R. Allen, Vicente R. Barros, John Broome, Wolfgang Cramer, Renate Christ, John A. Church, et al. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <http://epic.awi.de/37530/>.
- Pankoke, David. 2014. ‘Sophisticated vs. Simple Systemic Risk Measures’. *University of St. Gallen, School of Finance Research Paper*, no. 2014/22. http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2577329.
- Popp, David. 2002. ‘Induced Innovation and Energy Prices’. *American Economic Review* 92 (1): 160–80. doi:10.1257/000282802760015658.
- Pottier, Antonin. 2014. ‘L’économie Dans L’impasse Climatique’. École polytechnique. http://www2.centre-cired.fr/IMG/pdf/pottier2014.these_economie_impasse_climatique.pdf.
- PRA, Prudential Regulation Authority. 2015. ‘The Impact of Climate Change on the UK Insurance Sector’. *Bank of England: London*. <http://www.bankofengland.co.uk/pradocuments/supervision/activities/pradefra0915.pdf>.
- Quinet, Alain, and Luc Baumstark. 2009. *La valeur tutélaire du carbone: [rapport au Premier ministre]*. Centre d’analyse stratégique. Paris: La Documentation française.
- R. H. Coase. 1974. ‘The Lighthouse in Economics’. *Journal of Law and Economics*, University of Chicago Press, 17 (2): 357–76.

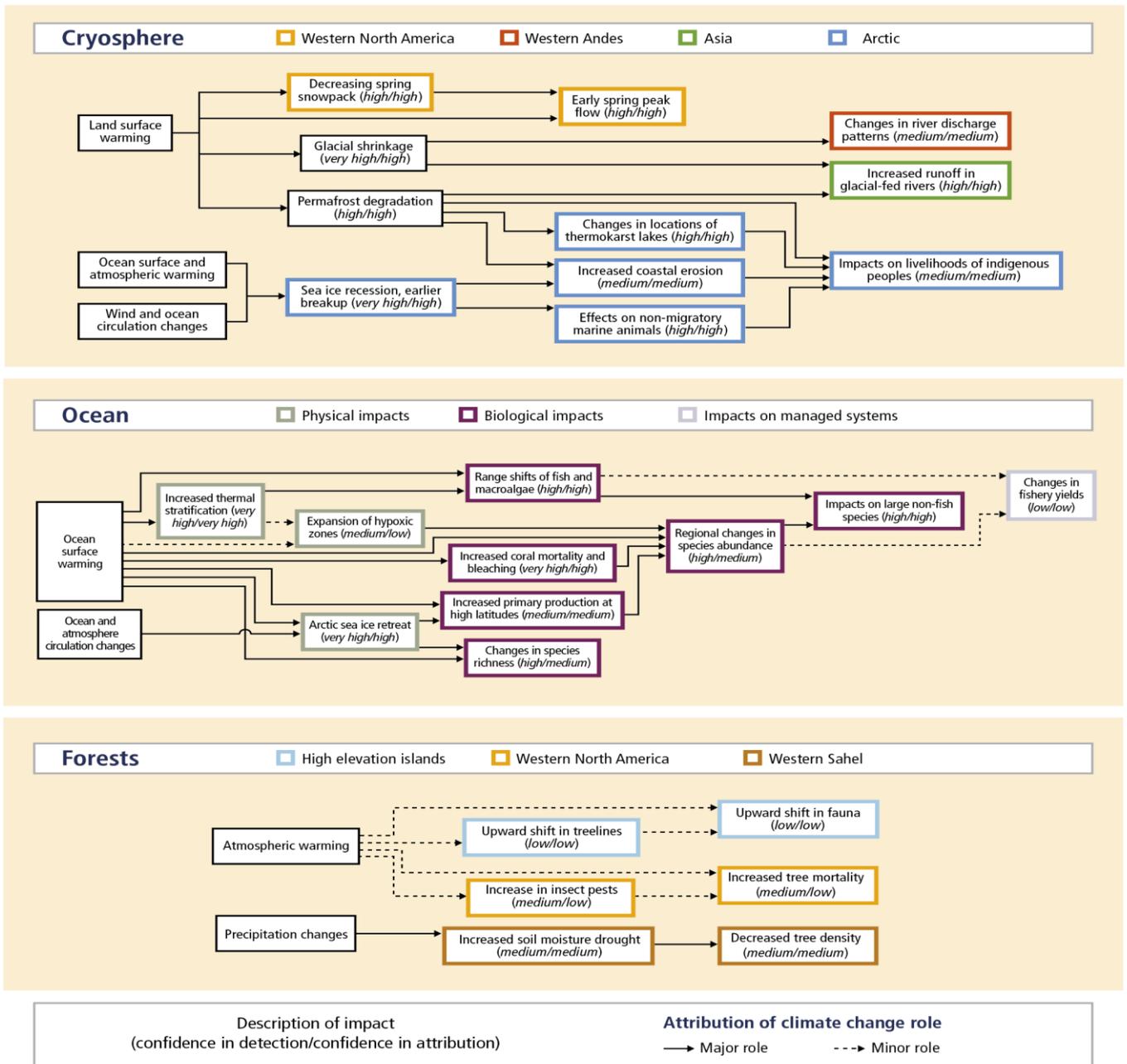
- ‘Rapport Sur Le Climat de La France Au 21e Siècle’. 2017. Accessed February 25.
<http://www.meteofrance.fr/actualites/12576645-rapport-sur-le-climat-de-la-france-au-21e-siecle>.
- ‘Results - European Banking Authority’. 2017. Accessed February 27. <http://www.eba.europa.eu/risk-analysis-and-data/eu-wide-stress-testing/2016/results>.
- Rose, Antoine. 2014. ‘La Comptabilité Des Émissions de Gaz À Effet de Serre Par Enjeu: Un Outil D’analyse Des Impacts Du Changement Climatique Sur Les Activités D’une Banque de Financement et D’investissement’. Université Paris Dauphine-Paris IX. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01084861/>.
- Runde, Jochen. 1998. ‘Clarifying Frank Knight’s Discussion of the Meaning of Risk and Uncertainty’. *Cambridge Journal of Economics* 22 (5): 539–46.
- Samuelson, Paul A. 1954. ‘The Pure Theory of Public Expenditure’. *The Review of Economics and Statistics* 36 (4): 387–89. doi:10.2307/1925895.
- Schoenmaker, Dirk, and Rens van Tilburg. 2016. ‘Financial Risks and Opportunities in the Time of Climate Change’. *Bruegel Policy Brief* 2016 (02): 1–8.
- Schultz, Martin G., Angelika Heil, Judith J. Hoelzemann, Allan Spessa, Kirsten Thonicke, Johann G. Goldammer, Alexander C. Held, Jose M. C. Pereira, and Maarten van het Bolscher. 2008. ‘Global Wildland Fire Emissions from 1960 to 2000: GLOBAL FIRE EMISSIONS 1960-2000’. *Global Biogeochemical Cycles* 22 (2): n/a-n/a. doi:10.1029/2007GB003031.
- Semmler, Willi, Helmut Maurer, and Anthony Bonen. 2016. ‘An Extended Integrated Assessment Model for Mitigation & Adaptation Policies on Climate Change’. <http://www.bankofengland.co.uk/research/Documents/conferences/extintassmdlspkpr.pdf>.
- Spedding, Paul, Kirtan Mehta, and Nick Robins. 2013. ‘Oil & Carbon Revisited’. *Europe*. <https://assets.documentcloud.org/documents/809475/hsbc-jan-2013-unburnable-reserves.pdf>.
- Stern, N. H., and Great Britain, eds. 2007. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press.
- Stern, Nicholas. 2013. ‘The Structure of Economic Modeling of the Potential Impacts of Climate Change: Grafting Gross Underestimation of Risk onto Already Narrow Science Models’. *Journal of Economic Literature* 51 (3): 838–59. doi:10.1257/jel.51.3.838.
- . 2016. ‘Economics: Current Climate Models Are Grossly Misleading’. *Nature News* 530 (7591): 407. doi:10.1038/530407a.
- Stern, Nicholas, and Felipe Calderon. 2015. *La nouvelle économie climatique: une meilleure croissance, un meilleur climat*. Paris: Les petits matins.
- Stiglitz, Joseph E. 1994. ‘The Role of the State in Financial Markets’. 14334. The World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/239281468741290885/The-role-of-the-state-in-financial-markets>.

- ‘Strengthening Insurance Partnerships in the Face of Climate Change – Insights from an Agent-Based Model of Flood Insurance in the UK – Centre for Climate Change Economics and Policy’. 2017. Accessed April 19. <https://www.cccep.ac.uk/publication/strengthening-insurance-partnerships-in-the-face-of-climate-change-insights-from-an-agent-based-model-of-flood-insurance-in-the-uk/>.
- Swiss Re Economic Research & Consulting. n.d. ‘Underinsurance of Property Risks : Closing the Gap’. No 5/2015. Sigma.
- Takada, Hideki, and Rob Youngman. 2017. ‘Can Green Bonds Fuel the Low-Carbon Transition?’ *OECD Insights Blog*. April 19. <http://oecdinsights.org/2017/04/19/can-green-bonds-fuel-the-low-carbon-transition/>.
- Teh, Tse-Ling. 2017. ‘Insurance Design in the Presence of Safety Nets’. *Journal of Public Economics* 149 (May): 47–58. doi:10.1016/j.jpubeco.2017.03.001.
- The Economist Intelligence Unit, and Vivid Economics. 2015. ‘The Cost of Inaction : Recognising the Value at Risk from Climate Change’. © *THE ECONOMIST INTELLIGENCE UNIT LIMITED 2015*.
- ‘The Importance of Looking Forward to Manage Risks: Submission to the Task Force on Climate-Related Financial Disclosures – Centre for Climate Change Economics and Policy’. 2017. Accessed April 19. <https://www.cccep.ac.uk/publication/the-importance-of-looking-forward-to-manage-risks-submission-to-the-task-force-on-climate-related-financial-disclosures/>.
- This, A. S. C., and Dirk Schoenmaker. 2016. ‘Reports of the Advisory Scientific Committee’. Accessed October 21. <https://www.ceps.eu/system/files/ASC%20Report%20no%206%20Climate%20change.pdf>.
- Tirole, Jean. 2016. *Économie Du Bien Commun*. 1er édition. Paris: Presses Universitaires de France.
- UNEP FI, CISL, and Inquiry. n.d. ‘Banking & Sustainability Time for Convergence. A Policy Briefing on the Links between Financial Stability and Environmental Sustainability’.
- ‘Valuing Predictability – Centre for Climate Change Economics and Policy’. 2017. Accessed April 19. <https://www.cccep.ac.uk/publication/valuing-predictability/>.
- Von Peter, Goetz, Sebastian Von Dahlen, and Sweta C. Saxena. 2012. ‘Unmitigated Disasters? New Evidence on the Macroeconomic Cost of Natural Catastrophes’. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2195975.
- Weyzig, Francis, Barbara Kuepper, Jan Willem van Gelder, and Rens van Tilburg. 2014. ‘The Price of Doing Too Little Too Late’. *The Impact of the Carbon Bubble on the EU Financial System. A Report Prepared for the Greens/EFA Group–European Parliament. Sustainable Finance Lab, Profundo, Green European Foundation. The Report Was Commissioned by: The Greens, European Free Alliance in the European Parliament*.

8. Annexes

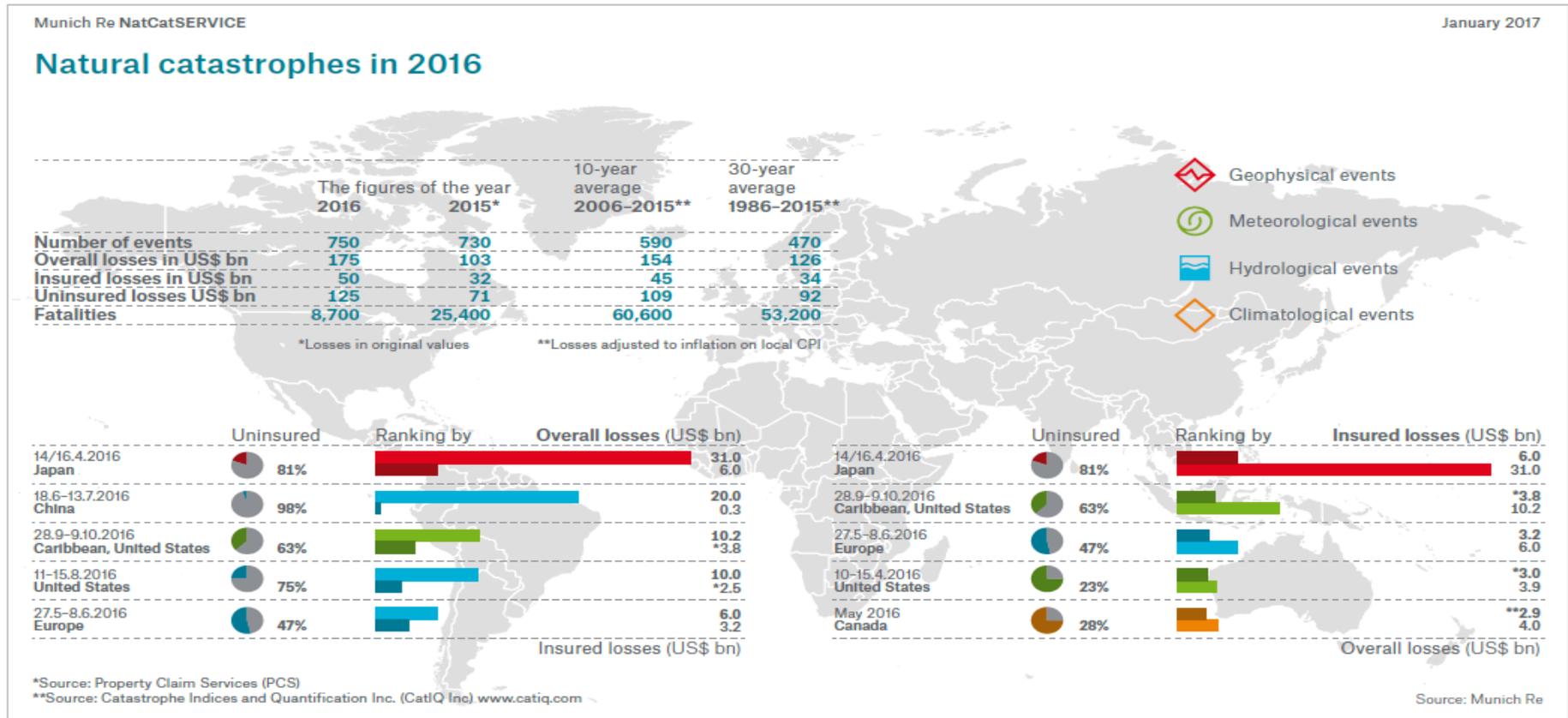
8.1. Cartographie des dérèglements physiques issus du réchauffement climatique

FIGURE 37. CARTOGRAPHIE DES DEREGLEMENTS PHYSIQUES ISSUS DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE



8.2. Munich Re infographie des catastrophes naturelles mondiales et leur pertes associées en 2016

FIGURE 38. INFOGRAPHIE DES CATASTROPHES NATURELLES MONDIALES ET LEUR PERTES ASSOCIEES EN 2016



SOURCES : MUNICH RE NATCAT, 2016

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Cette thèse se penche sur les enjeux du financement de la transition énergétique en France. L'objectif de déterminer comment orchestrer et harmoniser une transition énergétique bas-carbone à l'échelle des acteurs qui doivent l'investir et la financer, autrement dit les ménages, entreprises et leurs intermédiaires financiers. Les travaux se sont déclinés en trois chapitres qui sont autant d'enjeux majeurs à soulever pour permettre la massification du financement de la transition énergétique en France, et dans la plupart des économies modernes : la question des objectifs nationaux en matière de réduction de la consommation énergétique finale dans le logement, la question de la valorisation des investissements privés en efficacité énergétique et la question des risques liés au changement climatique.

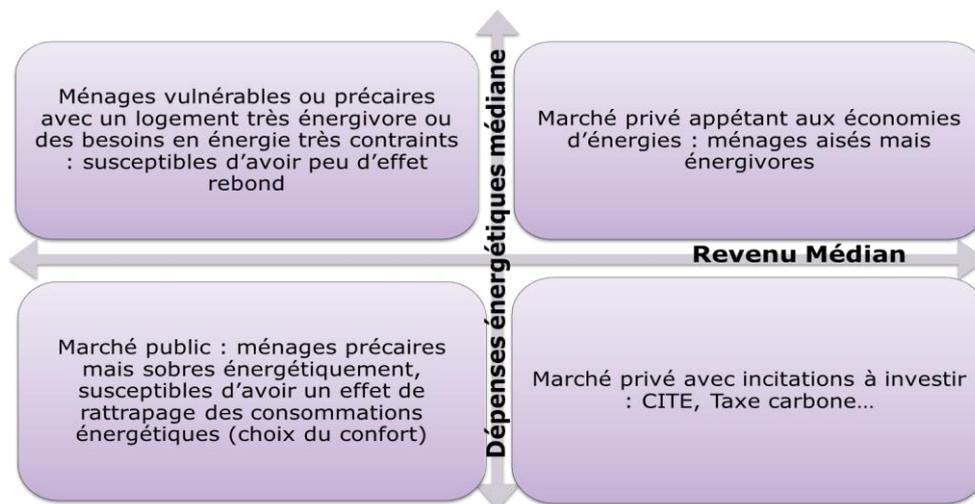
Dans le premier chapitre, les travaux se sont concentrés sur la compréhension des facteurs de consommation énergétique des ménages dans leur logement. L'objectif était de déterminer si les objectifs macroéconomiques en termes de réduction de la consommation d'énergie ne pouvaient pas être améliorés par une connaissance plus fine et moins linéaire des usages énergétiques et des arbitrages microéconomiques des ménages dans leur logement. Une approche économétrique de segmentation des dépenses énergétiques des ménages en fonction des caractéristiques socioéconomiques et celles liées à leur logement ou leur localisation a permis de faire émerger des groupes de consommation homogènes, répondant chacun à des usages énergétiques spécifiques. De ces groupes répartis en fonction d'un quadrant dépenses énergétiques / revenus, il a été possible de déduire un effet rebond potentiel et différencié, mesurant l'écart entre l'issue des arbitrages microéconomiques de consommation énergétique dans le logement, et la réalisation des objectifs macroéconomiques de réduction de la demande énergétique finale des ménages.

Après la conduite d'une typologie permettant d'identifier plusieurs portraits types, deux groupes de ménages sont ressortis. Un premier groupe rassemble des ménages vulnérables, précaires et dont les dépenses énergétiques sont les plus contraintes. Le second groupe, à l'inverse, rassemble des ménages plus aisés mais dont la consommation énergétique élevée les place au premier rang de prospects d'un marché privé de la transition énergétique dans le logement (se traduisant par un potentiel d'investissement privé dans l'efficacité énergétique des logements). La segmentation du « marché » de l'efficacité et de la transition énergétique dans le logement (Figure 39) appelle donc à raisonner avec cette double logique, une logique sociale de soutien et d'aide publique et une

logique de marché d'incitation à l'investissement privé. Les ménages qui n'en n'ont pas les moyens doivent bénéficier d'aides et d'un soutien des pouvoirs publics pour s'inscrire eux aussi dans une transition énergétique souhaitable pour tous. Pour ce faire, et selon la position des ménages précaires dans ce quadrant, les pouvoirs publics disposent de deux leviers : un levier budgétaire énergétique, destiné à lutter contre la précarité énergétique, la dépendance des ménages aux prix de l'énergie et à la mauvaise qualité subie de leur logement ; et un levier d'aides sociales destinées à lutter contre la précarité sous toutes ses formes car nous avons vu que la précarité énergétique n'est en grande partie qu'un reflet d'une paupérisation plus généralisée. Cette logique doit être combinée avec la question du cycle de vie des ménages et de leur logement car la question du revenu, du statut d'occupation et de l'âge du logement apportent ensemble un ciblage précis et robuste des outils et mesures efficaces à déployer.

La frontière horizontale du marché est poreuse car si l'on peut discriminer des mesures par des contraintes de revenus, il est impossible de les discriminer en termes d'usage. Cela crée des effets d'aubaine et une utilisation sous-optimale de l'argent public. Les ménages solvables, quant à eux, sauraient répondre aux facteurs de décision de l'investissement privé qui appellent à des leviers différents, pas forcément tous reliés à la rentabilité purement opérationnelle du projet de rénovation énergétique mais aussi, voire surtout, à des questions de confort thermique, d'amélioration de la qualité du logement et de sa valeur patrimoniale globale. Les ménages aux revenus et consommations énergétiques importants (les ménages identifiés HIHC dans le premier chapitre de cette thèse) jouissent d'un revenu suffisant pour souhaiter investir dans l'efficacité énergétique dans leur logement. Pour ces ménages, ce sont les leviers de décision et les véhicules de financement sur lesquels il faut agir. Un levier bancaire traditionnel est même envisageable dans la mesure où l'intermédiaire financier est lui-même au fait des enjeux en matière de transition énergétique et en matière de décision d'investissement et de rentabilité de ce type de projets. C'est à cette question primordiale que le deuxième chapitre de cette thèse a tenté de répondre.

FIGURE 39. SCHEMA DE SEGMENTATION DE LA TRANSITION ENERGETIQUE DANS LE LOGEMENT RESIDENTIEL



SOURCES : AUTEUR

NOTES : LE SCHEMA PRESENTE UNE SEGMENTATION EN QUATRE GROUPES DU « MARCHÉ » DE LA TRANSITION ENERGETIQUE DANS LE LOGEMENT. LA SEGMENTATION HORIZONTALE REPRESENTE LA DISTANCE DE CHAQUE GROUPE AU REVENU MEDIAN ET L'AXE VERTICAL REPRESENTE LA DISTANCE DE CHAQUE GROUPE AU NIVEAU DE DEPENSES ENERGETIQUES MEDIANES¹⁰¹

L'enjeu est donc de convertir le parc de logement et la consommation des ménages à la transition énergétique bas carbone en évitant deux écueils. Sur le versant public, les objectifs de réduction de consommation doivent s'effectuer dans le respect des attentes sociétales en matière d'équité des conditions de vie. Cela implique d'intégrer dans ses objectifs de long terme un effet rebond transitoire, résultat de la convergence des niveaux de consommation énergétique et le reflet d'un rattrapage social louable et désirable. Ce rattrapage, s'il se généralise à l'international doit bien sûr se combiner avec des efforts de sobriété énergétique au niveau agrégé. En cela, la recherche d'efficacité énergétique dans le logement est le meilleur levier d'action. Elle permet à la fois la convergence des conditions de vie de par la lutte contre la précarité énergétique et la rationalisation de la demande finale en énergie. Sur le versant privé, l'enjeu est d'inciter les ménages à repenser leurs consommations énergétiques et la qualité de leur logement tout en évitant à la fois les effets d'aubaine, capteurs à perte d'argent public, et les effets d'éviction. L'idée est ici de solutionner l'éternelle question de la rentabilité.

Au sein du marché privé, il subsiste un paradoxe énergétique résultant notamment d'une mauvaise connaissance de la valeur intrinsèque de la transition énergétique bas-carbone. **Le second chapitre de cette thèse** a tenté de lever l'une des barrières à l'investissement privé qui suppose que le

¹⁰¹ Voir le chapitre 1 pour un schéma appliqué à l'enquête logement 2013 de l'Insee.

marché sous-estime, par manque d'information et de transparence, la valeur patrimoniale de la qualité énergétique des logements.

Les travaux réalisés concluent sur un constat de bon augure : la performance énergétique du logement privé résidentiel est récompensée, sur un marché local, par une valeur patrimoniale significative associée à ce que l'on peut qualifier de valeur verte. Les logements assortis d'un label énergétique performant (une bonne note - A, B ou C lors du Diagnostic de Performance Énergétique qui traduit une consommation normative par m² et par an) se vendent plus chers que d'autres à caractéristiques et localisation équivalentes. Cette valeur est robuste à plusieurs méthodes de modélisation et d'inférence statistique ; selon la méthode rompue des prix hédoniques extraite de la littérature et selon la nouvelle approche choisie et mise en place dans notre second chapitre. L'estimation par la méthode des fonctions frontières affecte cependant une valeur verte des logements plus faible (entre 1% et 1,5%) que celle attribuée en moyenne par les méthodes hédoniques (entre 3,5% et 4,5%). La valeur verte des logements couvrirait entre 7% et 15% des investissements nécessaires pour aboutir à un niveau satisfaisant de performance selon une estimation empirique des coûts d'investissement¹⁰².

Le différentiel d'estimation constaté avec la littérature économétrique hédonique peut-être notamment expliqué par l'utilisation de régressions semi-paramétriques plus robustes, et le traitement des variables spatiales. Fizaine et al. (2017) montrent dans leur méta-analyse que les estimations qui prennent en compte des vecteurs de distance obtiennent les estimations les plus conservatives alors que les modèles qui intègrent des variables spatiales précises faisant état des effets de contiguïté et de voisinage obtiennent des estimations plus élevées. La suite logique du travail utilisant des fonctions frontières devrait intégrer des dépendances spatiales plus fines afin de vérifier ce constat¹⁰³.

Toutefois, au-delà de la question de validation de la méthode d'estimation, la validation de la présence d'une valeur verte, même selon les études les plus optimistes ne solutionne pas entièrement la question de la rentabilité des investissements privés en matière de performance énergétique du logement. La valorisation du confort et, plus généralement, de l'utilité non monétaire dans l'incitation privée à l'investissement dans l'efficacité énergétique doit être un futur champ d'investigation dans la mesure où le confort reste le déterminant principal d'une décision à

¹⁰² Méthode issue de la collecte de données sur cas concrets qui peut être améliorée par le développement d'un historique satisfaisant et intégrant les économies d'échelle encore à réaliser

¹⁰³ A ce jour et à notre connaissance, il existe très peu d'études combinant les deux aspects, nous pouvons citer à cet égard (Fusco and Vidoli 2015) pour le développement d'outils de calcul de frontières stochastiques spatiales paramétriques sous R.

l'investissement. La solution doit passer par l'action combinée des leviers bancaires privés et fiscaux. Une offre bancaire intégrée permet de lever les barrières informationnelles à la fois sur la valeur des investissements (en capitalisant sur la valeur verte des logements et sur une valorisation du confort énergétique) et sur l'alignement des incitations des différentes parties prenantes (investisseurs, artisans, financeurs, consommateurs et pouvoirs publics). Le banquier joue ici le rôle de fournisseur d'information et de conseil. Il peut agir sur les points focaux du cycle de vie combiné du ménage et de son logement en proposant, par exemple, une offre de financement qui englobe à la fois un prêt logement traditionnel et une enveloppe de travaux énergétiques éligibles aux subventions et incitations fiscales en place. Le levier fiscal incitatif et intelligent doit jouer également sur le cycle de vie des ménages et de leur logement en proposant des subventions ciblées sur les points d'achoppement : prêt à taux zéro à l'achat du bien immobilier et système de bonus-malus au moment de la transaction (mise en vente ou en location).

Afin d'approfondir et de développer les résultats obtenus, il faut noter que les outils de politique énergétique actuels ne touchent qu'une partie du marché — logement individuels et logement social — mais en délaissent une autre : logement collectif privé et parc locatif. La rénovation énergétique des copropriétés est un champ d'investigation clé qui, parce qu'il implique tous les éléments conceptuels liés à la prise de décision collective est traitée sous l'angle sociologique (Brisepierre 2014). Ce qui a été traité par la théorie économique sous l'angle de la théorie des jeux serait peut-être adaptable à l'échelle d'un logement collectif et pourra faire l'objet de futurs travaux. La valorisation patrimoniale de la transition énergétique et du confort thermique (valeur verte) permet de lever les obstacles d'accès des locataires à une certaine qualité de logement. Victimes d'une double contrainte (factures plus élevées, risque de précarité accru et absence de pouvoir de décision), les locataires représentent une part de la population dont les intérêts doivent être pris en compte grâce, à nouveau, à la collaboration entre pouvoirs publics et agents privés. La question et la situation des locataires est problématique et sort du giron d'investigation de cette thèse qui se concentrait finalement sur les interactions entre investissement dans la performance énergétique du logement et financement bancaire. Nous avons vu pourtant dans le premier chapitre que les locataires souffrent doublement d'une vulnérabilité sur leur consommation énergétique et ce point mérite de plus amples recherches.

L'activité, le rôle et les compétences des banques peuvent retrouver tout leur sens au service du climat. La transition énergétique bas-carbone, notamment au niveau européen, a besoin des intermédiaires financiers pour le financement de son activité. Les banques, en tant qu'intermédiaires financiers privilégiés, sont au cœur de ce besoin de financement. La nécessité

pour les banques d'agir dès aujourd'hui pour une transition énergétique vertueuse et la transformation douce de ses bilans vers une structure plus résiliente aux risques climatiques bénéficieraient également à l'économie réelle et contribueraient à la stabilité du système financier. En cela, les différentes fonctions de la banque déclinées pour satisfaire les enjeux liés au climat peuvent aboutir à une croissance soutenable pour le système économique et financier :

- 1) **Création monétaire, intermédiation et pourvoyeurs de liquidités** : La transition énergétique au niveau mondial va nécessiter des investissements titanesques : BNEF a calculé que 320Mds\$ ont été investis dans la croissance verte en 2015 mais que 12000 Mds\$ sont nécessaires d'ici à 2040, soit 485Mds\$ par an. Seuls les marchés financiers sont capables de fournir une liquidité et des investissements aussi importants.
- 2) **Réducteur et gestionnaire de risques** : Les risques liés au changement climatiques sont désormais identifiés, notamment dans le discours de Mark Carney, comme la famille de risque la plus sensible et importante des prochaines décennies. Les agents financiers sont les mieux placés pour gérer ces risques croissants — environnementaux, de transition ou d'adaptation — car, en effet, il s'agit de l'une de leur fonction première et expertise majeure.
- 3) **Transformation des horizons** : Comment transformer une ressource courte en emploi long ? Cette fonction primordiale des intermédiaires financiers peut permettre aux agents économiques de dépasser les défaillances liées à la préservation du climat : la tragédie des horizons et celle du passager clandestin.

Ce rôle résonne d'autant plus lorsque l'on connaît les enjeux pratiques de la réalisation concrète d'une transition énergétique :

- Mise à disposition de liquidités pour les ménages et PME afin de massifier la transition énergétique. Cela suppose, côté demande, le financement des solutions de réduction de la consommation finale pour les ménages (notamment par la rénovation de leur logement) ; et côté offre, le financement des solutions, des compétences, et des innovations afin de rendre l'offre d'énergie et de services énergétiques compatibles avec une transition bas-carbone car il n'y aura pas de massification sans innovation.
- Fournir un intermédiaire de confiance pour limiter les écarts entre objectifs macroéconomiques et arbitrages microéconomiques.
- Fournir l'information et la garantie nécessaires pour assurer la rentabilité des investissements privés. Nous avons vu qu'il s'agit d'un sujet clé dans le domaine de l'efficacité énergétique dans le logement

- Prévenir les risques climatiques qui touchent les agents les plus vulnérables de l'économie réelle: les risques de fragilité du stock d'actifs existant face aux perturbations climatiques physiques, mais aussi ceux liés à un manque de résilience des agents contraints (ménages et PME) à une transition énergétique trop brutale pour leurs actifs immobilisés, inadaptables à court terme sans coût

La création d'une valeur carbone par l'intégration des risques liés aux enjeux climatiques dans la formation des prix de marché (ou de leur pondération par leur risque associés) semble donc d'avantage convenir aux enjeux pratiques et aux développements actuels de la relation entre finance et climat. **Le dernier chapitre de cette thèse** se penche sur l'identification, la transmission et la mesure des risques climatiques au secteur financier et, en particulier, au secteur bancaire en distinguant trois types de risques climatiques : les risques physiques, les risques de transition et les risques fiduciaires et de réputation. L'attention a été portée sur la transmission de ces risques à la sphère bancaire et aux risques finaux du secteur : risques opérationnels, risques de crédit, risques de marchés. L'objectif de ce chapitre est ensuite d'établir un état des lieux des outils de mesure des risques climatiques ainsi que leurs limites et de proposer des pistes pour enrichir les pratiques actuelles. La seconde section du chapitre se penche sur le rôle des autorités de régulation du secteur financier et bancaire et de leurs pratiques d'internalisation des risques climatiques, notamment lorsqu'ils revêtent un caractère systémique. Si l'ensemble des institutions financières prennent en compte cette nouvelle famille de risques, une valeur sociale du carbone peut prendre la forme d'un prix explicite ou implicite, endogène aux marchés sous la forme d'une prime de risque. L'une des plus grandes innovations de rupture attendue à ce jour peut s'opérer au cœur des systèmes financiers et dans leur manière de valoriser leur empreinte climatique. Si les marchés et les institutions financières parviennent à identifier, mesurer et intégrer ce risque dans la conduite de leurs activités d'investissement, de financement et de couverture, cela favorise l'émergence d'une demande pour des projets de transition et fournit des outils de valorisation des investissements dédiés à une transition énergétique vertueuse. Pour accompagner ce changement, les Etats peuvent donner l'impulsion aux innovations radicales par des investissements massifs dans certains postes de prédilection comme la R&D et l'infrastructure de réseau afin de construire un horizon prospectif favorable à la fois dans la sphère publique et privée. Les banques centrales peuvent à leur tour repenser les outils de régulation des activités bancaires vers la promotion des investissements compatibles avec des trajectoires de réchauffement en deçà de 2°.

Cela implique de définir le périmètre d'intervention et de pouvoir trouver des outils pour mesurer l'activité « verte » des activités bancaires et financières. Le secteur du logement incarne les possibilités de cette collaboration. Ce secteur est au cœur des besoins de massification de la transition énergétique et d'un besoin de couverture des risques climatiques. Grâce aux stratégies bas-carbone successives mises en place dans le secteur, jouit d'une certaine visibilité quant à la compatibilité des actifs immobiliers financés à une trajectoire bas-carbone. En effet, les nouvelles constructions bénéficient d'une réglementation thermique stricte et le stock de logement existant est au cœur d'un dispositif d'amélioration de la performance énergétique, indiquée par des labels reconnus (RGE) et un outil de notation obligatoire depuis 2011 avant la mise en vente ou location : le DPE.

Les réflexions menées ici sur les enjeux de financement de la transition énergétique et les risques climatiques appellent, de par leur extrême nouveauté, à un approfondissement des recherches sur plusieurs sujets dont l'énumération réalisée ici est loin d'être exhaustive.

D'une part, la transformation digitale de l'économie va forcément influencer sur les modalités de levier de transition énergétique à l'échelle des entreprises, des ménages et intermédiaires financiers. Elle conditionne même sa réussite en permettant la mise en place d'une grille de lecture spécifique. En effet, la valorisation de la transition énergétique passe par l'acquisition d'un système de connaissance à haute valeur ajoutée, c'est-à-dire un socle d'informations complexes, complètes et désagrégées. La convergence de la transition énergétique et de la transition numérique peut être une étape primordiale de succès et la solution de la mesure des expositions aux risques climatiques ainsi que l'éternelle question de la rentabilité.

D'autre part, le déploiement d'un cadre réglementaire juste et éclairé, permet aux banques de s'approprier le sujet du changement climatique et de la transition énergétique bas-carbone dans le but d'en maîtriser les risques. Il doit également fournir la possibilité de s'en couvrir et d'en saisir les opportunités de financement. La mise en place d'un *stress test* climatique pour les banques françaises est un sujet exploratoire qui nécessite la conduite de recherches approfondies notamment sur la question de l'élaboration des scénarios, de la collecte de données et de l'effet performatif de l'exercice.

Enfin, la question d'un risque climatique systémique et l'élaboration ou l'adaptation d'instruments macroprudentiels idoines doit également faire l'objet de recherches approfondies en particulier sur l'exposition du secteur bancaire aux risques physiques indirects (ou de second tour) et l'impact à la fois sur la valeur du collatéral mais également sur la solvabilité des ménages d'un retrait ou d'un

renchérissement de la couverture assurantielle privée et/ou publique. Le risque climatique systémique naît des interactions et du transfert de risque entre banques et assureurs et d'un effet domino potentiel entre le risque de crédit et la propension des agents les plus sujets aux risques climatiques, le risque de pertes pour les assureurs et le risque final de crédit bancaire.

Nous devons tendre vers la collaboration entre sphère publique et privée « à la Ostrom¹⁰⁴ » qui pourrait prendre la forme d'une gouvernance partagée, capable de relever le défi climatique. L'Etat, ou l'institution publique, sont nécessaires comme maîtres d'ouvrage. Les intermédiaires financiers ont un rôle indispensable comme artisans de la volonté et l'effort d'adaptation des agents de l'économie réelle et de leurs actifs à une transition énergétique bas-carbone. La sphère publique et régulatrice détient les droits de propriété de la transition énergétique (sous la forme de certificats qui valideraient la bonne et due forme des financements et d'accompagnement des efforts de transition par une meilleure attribution des exigences de contrepartie des risques), tout en laissant à la sphère privée l'initiative de financer et de tirer profit des investissements dans une transition énergétique bas-carbone comme elle a pu le faire pour le marché de l'éclairage des ports anglais au 17^e siècle (Coase, 1957). La mise en place au sein du Plan Juncker d'un mécanisme de *Quantitative Easing* vert est un exemple de ce type de mécanisme innovant de financements directs de projets pour les banques et compagnies d'assurances via la mise en place d'instruments de titrisation dédiés (Aglietta & Espagne, 2016).

¹⁰⁴ Terme qui reprend les théories d'Elinor Ostrom sur la gestion des biens communs (voir chapitre 3, section 1).

« Nous avons observé qu'un défi excessif ou insuffisant ne peut susciter une réponse créatrice, et qu'un défi qui se situe juste à la limite de l'excès – lequel semble être à première vue, le défi le plus stimulant de tous – aura tendance à imposer à ceux qui y répondent une sanction funeste sous la forme d'un arrêt dans leur développement. Et ici évidemment gît le secret de la croissance dont nous sommes en quête. Car à la longue, le défi optimal doit être celui qui incite le groupe défié non seulement à fournir une seule réponse couronnée de succès, mais aussi à acquérir une force qui le pousse en avant : d'un exploit à de nouveaux combats, de la solution d'un problème à la présentation d'un autre, d'une pause vers un nouveau départ, une fois de plus de Yin à Yang. Le simple et unique passage d'un état de trouble au rétablissement de l'équilibre ne suffit pas si la genèse ne doit pas être suivie de croissance. »

(Arnold Toynbee. *L'Histoire* p.194, 1996)