

« Principe d'efficacité entre technique et économie. Calculs de rendement des premiers moteurs électriques (1881 – 1914) », Aurélie Baro

*Ecole doctorale* : Economie, organisation, société (ED 396)

*Spécialité* : Sociologie

*Date de soutenance* : 24 avril 2017

**Jury :**

*Rapporteurs*

Luc Marco, professeur émérite de gestion à l'université Paris 13, spécialiste d'histoire économique et d'histoire de la pensée économique

Kostas Chatzis, chercheur HDR à l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, spécialiste de l'histoire des ingénieurs et de la mécanique

*Président*

Christophe Bénavent, professeur de gestion à Nanterre, directeur de l'école doctorale

*Directeur de thèse*

François Vatin, professeur de sociologie à l'université Paris Ouest Nanterre La Défense et chercheur au laboratoire IDHES



Introduction .....	2
I. Rôle de la matière & Valeur de la technique .....	6
1. Culture technique .....	6
2. Universalité et vertu civilisatrice de la technique, par Marcel Mauss .....	8
3. Matière, milieux et tendance chez André Leroi-Gourhan .....	10
4. La matière et nous chez les sociologues de l'innovation. Exemples .....	13
5. La matière puis nous chez Pierre Lemonnier .....	21
A) Quand la distance ne comptait pas : premiers calculs de rendement des moteurs électriques (1840 – 1873).....	23
II. Première catégorie de moteurs.....	23
1. Concurrence entre machines à vapeur et moteurs électriques.....	23
2. Premiers principes de fonctionnement d'un moteur électrique au 19 <sup>ème</sup> siècle. Le télégraphe Morse comme nouvelle espèce technique. Concept d' « imitation » de Gabriel Tarde .....	25
3. Analogie entre la construction des moteurs électrique et celle des machines à vapeur. Le piston, « élément technique » au sens de G. Simondon.....	27
4. Première évaluation théorique d'un moteur électrique par Moritz Jacobi en 1840. Influence de la théorie mécanique dans les calculs de rendement.....	35
III. Deuxième catégorie de moteurs. Aux origines de la production du courant. Transition des piles aux premières machines génératrices de courant, réversibles.....	41
1. Bilan sur la construction des premiers moteurs électriques avant 1873 .....	41
2. Le commutateur pour mimer le courant fourni par les piles .....	43
3. Les premières génératrices de courant, réversibles. La dynamo Gramme .....	54
B) Quand la distance compte : construction du réseau, guerre des courants et effets sur les moteurs électriques (1881 – 1914) .....	62
Introduction .....	62
Origines de la centralisation de la production d'énergie électrique .....	63
IV. Systèmes à courant continu : les limites du cuivre .....	68
1. Débats autour de l'utilisation du cuivre selon Marcel Deprez .....	68
2. Premières expériences de Marcel Deprez. Lutte entre les mécaniciens et les électriciens .....	85

3. Intégration industrielle du système de Marcel Deprez .....	104
4. Contexte politique et financier autour de la dernière expérience de Marcel Deprez .	122
5. Succès du courant continu en Suisse avec René Thury (1860 – 1938) 1886 – 1889 : Bourganeuf, ville où René Thury et Marcel Deprez se sont croisés .....	135
V. Victoire de la distribution en courant alternatif .....	144
1. Courants à haute tension et nécessité du transformateur.....	144
2. Tramways électriques. Passage du courant continu à l’alternatif. Une construction des moteurs adaptée.....	166
VI. Tarification.....	190
1. Gestion publique ou privée des réseaux routiers et ferroviaires en France. Calculs d’ingénieurs .....	191
2. Débats sur les tarifs des gestionnaires de centrales électriques aux Etats-Unis. L’efficacité des réseaux sociaux en question.....	206
C) Technique et efficacité.....	230
VII. Efficacité / Liberté. Prise en compte du maximum de nœuds possible dans le réseau .....	230
1. Réseau.....	230
2. Autonomie. Installations et moteurs autonomes, production et distribution décentralisée .....	237
VIII. Fin de la guerre des courants .....	268
1. Lucien Gaulard. Problème de la nationalité .....	268
2. Carrière de Marcel Deprez .....	273
3. Nikola Tesla, porte parole des Modernes ?.....	276
4. Postérité croisée de René Thury et Gustave Cabanellas .....	280
5. La passion d’innover .....	283
6. Le génie collectif.....	285
Conclusion .....	287
IX. Poursuite des recherches sur l’efficacité. Changement politique .....	287
1. Les « civilisés » et les « sauvages » par André Leroi-Gourhan. Les milieux comme facteur d’évolution.....	287
2. Politique des sociologues de l’innovation. La matière et nous .....	292

3. Les matières premières de l'Afrique .....	307
4. Histoire globale, par Simon Schaffer & Kapil Raj .....	310
Bilan .....	316
Schéma .....	319
Glossaire .....	321
Aimant .....	321
Armature .....	321
Bobine d'induction.....	321
Champ magnétique .....	321
Collecteur .....	322
Commutateur .....	322
Courant alternatif.....	322
Courant continu .....	322
Courants de Foucault .....	323
Courants polyphasés .....	323
Circuit en parallèle.....	323
Circuit en série.....	323
Electro-aimant .....	323
Force contre-électromotrice .....	324
Inducteur .....	324
Induction .....	324
Induit .....	324
Intensité .....	325
Machine auto-excitatrice .....	325
Machine dynamo-électrique.....	325
Machine magnéto-électrique.....	325
Moteur à champs tournants .....	325
Moteur synchrone.....	326
Moteur synchrone.....	326
Tension ou force électromotrice.....	326

Transformateur.....	327
Bibliographie .....	327
A .....	327
B.....	327
C.....	329
D .....	331
E.....	333
F .....	333
G .....	335
H .....	338
I.....	339
J.....	340
K.....	340
L .....	341
M.....	343
N.....	344
P .....	345
R.....	345
S .....	346
T.....	348
V.....	349
Divers.....	350

## Remerciements

Je remercie ma famille et mes amis qui savent ce que ce travail leur doit, ainsi que mes anciens collègues de la sécurité, du ménage, de la maintenance et de l'accueil à Essilor Créteil, du cabinet Nony, du laboratoire Institutions et Dynamiques Historiques de l'Economie et de la Société (IDHES), de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, de Parcours des Sciences et du Comité d'histoire de l'électricité et de l'énergie d'EDF. Je remercie également les professeurs et jeunes chercheurs rencontrés lors du séminaire « Frontières mouvantes entre science et savoir. Une géo-histoire » à l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS). Enfin je remercie mon directeur de thèse, grâce à qui j'ai tant appris et sans qui les lignes qui suivent n'auraient pu être écrites.

# Principe d'efficience entre technique et économie. Calculs de rendement des premiers moteurs électriques (1881 – 1914)

---

## Introduction

Dès la seconde moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, la production, le transport et la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique soulevèrent l'intérêt à la fois de la communauté scientifique et de l'industrie. La réalisation d'une telle transformation était possible grâce à la découverte du moteur électrique.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'évaluation des moteurs électriques à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, alors que leur utilisation industrielle commençait à peine. Nous nous intéresserons aux méthodes théoriques employées par les premiers ingénieurs électriciens pour démontrer que le moteur électrique pouvait remplacer économiquement les autres moteurs alors disponibles dans l'industrie des transports, principalement le cheval, la machine à vapeur, le moteur à gaz ou à air comprimé. Nous ferons appel à des travaux de sociologie et d'histoire pour mieux comprendre l'essor de ce type particulier de machines, symboles de la quête d'une certaine efficacité.

En termes de méthode, Auguste Comte le rappelle, « le commencement de toute étude consiste à rassembler des faits non analysés, et à amasser telles généralisations qui se présentent spontanément à la sagacité naturelle. »<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> John Stuart Mill (1893, 5<sup>ème</sup> édition), *Auguste Comte et le positivisme*, Paris : F. Lacan, p42.

Concernant notre période d'étude, les historiens Emmanuel Fureix et François Jarrige nous rappellent que le 19<sup>ème</sup> siècle se caractérise par l'émergence d'une nouvelle religion, l'histoire : « Le XIX<sup>e</sup> siècle est le premier à se nommer. Il est aussi le siècle de l'histoire, des historiens et de l'invention d'une historiographie savante. Qu'elle soit « philosophique », « érudite » ou « scientifique », l'histoire obsède les contemporains. »<sup>1</sup>

Dans notre histoire, nous évoquerons brièvement l'enfance du moteur électrique, notamment les machines productrices de force motrice qui existaient avant l'invention du moteur électrique, dont les machines à vapeur. Nous verrons comment la construction des premiers moteurs électriques s'inspirait de celle de ces dernières.

Pour calculer le rendement de ces premiers moteurs électriques, les ingénieurs électriciens s'appuyaient sur les concepts de « travail mécanique » et de « puissance » (travail par unité de temps) qu'avaient élaborés les ingénieurs mécaniciens au début du XIX<sup>e</sup> siècle, qui avaient déjà été adaptés aux processus thermodynamiques pour l'évaluation des machines à vapeur<sup>2</sup>. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux travaux du physicien Moritz Jacobi parus dans un mémoire de 1840, ainsi qu'à ceux de l'ingénieur Marcel Deprez publiés dans la revue *La Lumière Electrique* en 1880<sup>3</sup>.

A la suite des travaux de François Vatin, nous nous intéresserons aux conditions sociologiques des calculs de rendement des moteurs électriques. La valeur de ce rendement, défini comme le ratio « puissance produite par le moteur » / « puissance consommée par le moteur », était presque la raison d'être du moteur électrique. Il était plus élevé que celui des moteurs concurrents.

Les tout premiers types de moteurs électriques étaient construits d'une telle manière qu'ils ne pouvaient générer que des forces de faible intensité. Néanmoins nous verrons que la

---

<sup>1</sup> Emmanuel Fureix et François Jarrige (2015), *La modernité enchantée. Relire l'histoire du XIX<sup>e</sup> siècle français*, Paris : Editions La Découverte.

<sup>2</sup> François Vatin. *Le travail. Economie et physique (1780-1830)*. Paris : Puf, 1993. Sur l'influence de la mécanique des machines sur la thermodynamique, voir Thomas Kuhn. *La Tension Essentielle. Tradition et changement dans les Sciences*. Paris : Gallimard, 1990.

<sup>3</sup> Marcel Deprez. « Des locomotives électriques ». *La Lumière Electrique*, n°20, 15 octobre 1880, pp410-412 ; n°22, 15 novembre 1880, pp453-454.

contrainte imposée par la matière fut finalement contournée, pour aboutir à l'invention de la dynamo et la découverte de sa réversibilité. L'Exposition internationale d'électricité à Paris en 1881 marqua l'arrivée du moteur électrique dans l'industrie.

Dans la jeune vie adulte du moteur électrique, nous parlerons des entreprises, des ingénieurs, investisseurs, hommes politiques et utilisateurs, responsables des premiers usages du moteur. Il nous semble notamment intéressant de regarder plus en détail le dénominateur de son rendement et de comprendre d'où vient l'énergie consommée par le moteur. C'est ce qui correspond à la seconde partie de la thèse, qui traite des débats autour de l'organisation de la production de l'énergie électrique consommée par les moteurs. Nous rappellerons ici pourquoi les débats aboutirent au fait que dans la majorité des cas, l'énergie électrique était transportée sur de longues distances, en courant alternatif. Nous aborderons les premiers obstacles auxquels ont dû faire face les premiers électriciens au cours des décennies 1880 et 1890. Le réseau électrique n'existait pas encore, cependant l'électricité comme source d'énergie commençait à être utilisée, pour l'éclairage principalement et dans une moindre mesure comme force motrice. Les machines servant à produire et à transporter l'électricité étaient évaluées et celles qui permettaient d'obtenir un système de transport et de distribution avec le meilleur rendement étaient en théorie retenue par l'industrie. Dans la pratique, avoir le meilleur rendement n'était pas toujours suffisant, les électriciens qui soutenaient un certain type de machines ou de systèmes de transport devaient aussi convaincre la communauté des électriciens. Cette communauté prit une forme visible en France en 1883 avec la création de la *Société internationale des électriciens*. Ses membres contribuèrent à la naissance de l'industrie électrique par leurs travaux théoriques et pratiques. Dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, l'un de leurs premiers soucis était de trouver un système composé de plusieurs machines reposant sur une technique suffisamment peu coûteuse pour pouvoir couvrir les besoins sur un espace large. L'idée qu'il fallait pour cela utiliser des courants électriques à haute tension fit progressivement l'unanimité. Deux types de courants étaient disponibles, le courant continu ou le courant alternatif ; lors de la décennie 1880, même si les recherches en courant alternatif aboutissaient à des résultats encourageants, c'est le courant continu qui était favorisé. Le coût le moins négligeable pour remplir l'objectif de transport à longue distance en courant

continu était le prix des fils de transmission, faits de cuivre, dont l'épaisseur garantissait de faibles pertes d'énergie lors des transports à grandes distances à haute tension. Nous verrons comment ce coût était appréhendé par plusieurs ingénieurs électriciens français, Marcel Deprez, Gustave Cabanellas et Maurice Lévy, et de manière moins détaillée par un ingénieur allemand, Oskar Frölich. Au-delà du problème du transport et de la distribution, un autre souci était de pouvoir sinon stocker, au moins réguler les flux d'énergie électrique afin de mettre en adéquation la production d'électricité avec son usage par les consommateurs. Des appareils tels que l'accumulateur, inventé par Gaston Planté (1834 – 1889) ou le générateur secondaire de Lucien Gaulard (1850 – 1888) permettaient de faire l'un ou l'autre. Cet aspect sera abordé dans la partie traitant de la tarification de l'électricité et s'appuyant sur les travaux des sociologues et historiens Mark Granovetter, Patrick McGuire et Valery Yakubovitch.

Enfin, la plupart de l'énergie électrique se transporta sur de longues distances au moyen de machines produisant des courants alternatifs de haute tension, ramenée à une tension plus basse avec des transformateurs. Ce système fut évalué comme étant le plus économique.

En ce qui concerne les usages des moteurs, les deux formes de courant subsistent, courant continu et alternatif. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux moteurs électriques de traction et nous tenterons de déterminer si le choix du courant alternatif pour la distribution de l'énergie électrique a signifié la fin de l'utilisation des moteurs à courant continu.

Nous verrons aussi que l'on aurait tout aussi bien pu se passer de la contrainte qu'imposait la matière (le cuivre) dans la construction des lignes de distribution en développant d'autres types de moteurs, tels que les moteurs à haute fréquence.

Enfin, nous aurions souhaité nous intéresser au numérateur du rendement des moteurs électriques, c'est-à-dire à la quantité de travail produite et à leurs usages, afin de pouvoir la comparer à celle produite par exemple par les chevaux ou par certains hommes ou femmes.

Il aurait également été intéressant d'étudier les origines matérielles du moteur électrique sur cette période. A défaut, dans une dernière partie, nous reviendrons sur la culture technique évoquée tout au long de la thèse et dans laquelle ces objets techniques sont venus prouver leur efficacité, à l'aide des travaux d'André Leroi-Gourhan, Bruno Latour, Simon Schaffer et François Vatin.

## *I. Rôle de la matière & Valeur de la technique*

Les travaux sur les techniques d'André Leroi-Gourhan, Bruno Latour et Pierre Lemonnier, et plus particulièrement le rôle qu'y joue la matière, peuvent nous aider à poser un cadre théorique autour de ce qu'ont tenté de faire certains ingénieurs face aux premiers moteurs électriques lorsqu'ils cherchaient à améliorer leur rendement. Dans ce cadre épistémologique, la matière est alternativement prise comme chose à dompter ou comme alliée.

### **1. Culture technique**

Pour nombre de sociologues et de philosophes des techniques, pour comprendre l'efficacité, il faut comprendre la technique et les pratiques associées. Bruno Latour écrit dans son article « Prendre le pli des techniques »<sup>1</sup> qu'il peut comprendre le mépris des Modernes à l'égard de la religion et de la psychologie, mais pas à l'égard de la technique. Il considère qu'il y a déjà suffisamment d'épistémologie, c'est-à-dire de connaissance sur la connaissance, mais pas assez de technologie, c'est-à-dire de connaissance sur la technique. La technique transporte pourtant des informations elle aussi, et les déforme. Bruno Latour regrette que les ingénieurs aient préféré jouer le rôle de « savants butés »<sup>2</sup> plutôt que de créer une connaissance de la technique. Ce qui amène à « creuser un abîme entre la pratique et la théorie de la pratique »<sup>3</sup>. Bruno Latour cite Gilbert Simondon, qui, pour définir le mode d'existence des objets

---

<sup>1</sup> Bruno Latour, « Prendre le pli des techniques », Numéro spécial de la revue *Réseaux*, Aout-Septembre 2010, Volume 28, n°163, p13-31.

<sup>2</sup> Ibid., p20.

<sup>3</sup> Ibid., p21.

techniques, titre de son ouvrage, s'est inspiré d'autres modes d'existence, tels que la religion, la philosophie, la science et la magie. La technique est un mode d'existence transcendant, comme tous les autres modes. La théologie, l'épistémologie, la psychologie ne suffisent pas à voir ce trou, il faut aussi de la technologie. Bruno Latour utilise l'expression « pliage technique »<sup>1</sup> pour désigner le fait que la technique peut modifier un autre mode d'existence, comme par exemple les techniques sportive ou juridique.

En ce qui concerne les machines, Gilbert Simondon décrit le problème de leur relation avec l'homme, ainsi que l'objectif de son ouvrage, avec les mots qui suivent :

« Ainsi, le malaise dans la situation relative de l'homme et de la machine provient du fait que l'un des rôles techniques, celui de l'individu, avait été tenu jusqu'à nos jours par des hommes ; n'étant plus être technique, l'homme est obligé d'apprendre une nouvelle fonction, et de trouver dans l'ensemble technique une place qui ne soit plus celle de l'individu technique ; le premier mouvement consiste à occuper les deux fonctions non individuelles, celle des éléments et celle de la direction de l'ensemble ; mais dans ces deux fonctions l'homme se trouve en conflit avec le souvenir de lui-même : l'homme a tellement joué le rôle de l'individu technique que la machine devenue individu technique paraît encore être un homme et occuper la place de l'homme, alors que c'est l'homme au contraire qui remplaçait provisoirement la machine avant que de véritables individus techniques aient pu se constituer. Dans tous les jugements qui sont portés sur la machine, il y a une humanisation implicite de la machine qui a comme source profonde ce changement de rôle ; l'homme avait appris à être l'être technique au point de croire que l'être technique devenu concret se met à jouer abusivement le rôle de l'homme. Les idées d'asservissement et de libération sont beaucoup trop liées à l'ancien statut de l'homme comme objet technique pour correspondre au vrai problème de la relation de l'homme et de la machine. Il est nécessaire que l'objet technique soit connu en lui-même pour que la relation de l'homme à la machine devienne stable et valide : d'où la nécessité d'une culture technique. »<sup>2</sup>

Plus loin :

« La tâche du technologue est donc d'être le représentant des êtres techniques auprès de ceux par qui s'élabore la culture : écrivains, artistes, et, très généralement, auprès de ceux que l'on nomme cynosaures en psychologie sociale. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid., p29.

<sup>2</sup> Gilbert Simondon (2012), *Du mode d'existence des objets techniques*, Editions Aubier, p102.

<sup>3</sup> Ibid., p208.

Dans le même esprit, Lewis Mumford a écrit :

« Par quelle logique absurde devons-nous nous incliner devant notre création, si c'est une machine, et la dédaigner comme "irréelle", si c'est une peinture, un poème ou un idéal moral ? La machine est, autant qu'un poème, une création de la pensée. »<sup>1</sup>

## 2. Universalité et vertu civilisatrice de la technique, par Marcel Mauss

### a) Universalité

Marcel Mauss s'intéressa lui aussi à la culture technique. Il définissait la technique comme « un acte traditionnel efficace (...). »<sup>2</sup> Un peu plus tard, il écrivait aussi : « On appelle technique, un groupe de mouvements, d'actes, généralement et en majorité manuels, organisés et traditionnels, concourant à obtenir un but connu comme physique ou chimique ou organique. »<sup>3</sup>

Pour Marcel Mauss, la technique est universelle<sup>4</sup>. Pour le démontrer, il remonta aux origines de la technique. Evoquant la magie (« (...) La magie est en fait la forme primitive de la technique »<sup>5</sup> ou « La magie, étant la technique la plus infantine, est peut-être la technique ancienne. »<sup>6</sup>), il s'intéressa plus particulièrement aux techniques du corps : « Pour dégager l'essence même de la technique, Mauss devait la réduire à sa forme la plus « pure », sans la médiation de l'objet. »<sup>7</sup>

En s'intéressant aux techniques du corps, l'objectif était de contredire ceux qui soutenaient l'idée que les hommes sont en danger face aux techniques dans leur ensemble. Marcel Mauss pouvait ainsi rappeler que l'homme est à l'origine des techniques<sup>8</sup>.

---

<sup>1</sup> Lewis Mumford (1934), *Technique et civilisation*, Traduit par Denise Moutonnier (1950), Paris : Editions du Seuil, p274.

<sup>2</sup> Marcel Mauss, « Les techniques du corps », *Journal de Psychologie*, vol. xxxii, no 3-4, 15 mars-15 avril 1935, p371.

<sup>3</sup> Marcel Mauss, « Les techniques et la technologie », *Revue du MAUSS*, 2004/1 (no 23), p.434-450, p436.

<sup>4</sup> François Vatin, « Mauss et la technologie », *Revue du MAUSS*, 2004/1 (no 23), p.418-433, p422.

<sup>5</sup> *Ibid.*, p421.

<sup>6</sup> Marcel Mauss cité par François Vatin, « Mauss et la technologie », *Revue du MAUSS*, 2004/1 (no 23), p.418-433, p422.

<sup>7</sup> *Ibid.*, p427.

<sup>8</sup> Bruno Karsenti, « Techniques du corps et normes sociales de Mauss à Leroi-Gourhan », *Intellectica*, n°26-27, 1998, p227-239, p233-234.

Bruno Karsenti nota que la difficulté de ce projet résidait dans le fait que le corps était à la limite du champ d'étude des sociologues : « Le corps est, pour le sociologue, de l'ordre du divers. »<sup>1</sup> Il précisa :

« C'est dans cette voie positive de réduction du "Divers", et de groupement organique d'une quantité considérable de faits que Mauss s'engage dans son étude sur "Les techniques du corps". A son tour, le projet taxinomique de Leroi-Gourhan ne fera que prolonger inlassablement cette même tentative de réduction et de mise en ordre. La difficulté épistémologique tient au fait que le projet appartient manifestement à une sorte de science frontalière, située au point d'affleurement du biologique et du social. Il s'agit de poser les jalons d'une authentique sociologie des corps — sociologie des manières d'être, des usages déterminés dont le corps est susceptible dans les différentes cultures. Techniques du corps au pluriel, tant les variations sont grandes, à la fois d'une société à l'autre, et au sein d'une même société — tant la diversité s'impose à l'ethnologue, qui longtemps a paru renoncer à toute classification stable et définie. »<sup>2</sup>

#### *b) « Vertu civilisatrice » du progrès technique*

François Vatin nous rappelle que chez Marcel Mauss, qui était technophile et progressiste<sup>3</sup>, « (...) le progrès technique et sa vertu civilisatrice sont pour lui [Marcel Mauss] un état de fait « par-delà le bien et le mal » »<sup>4</sup>

Marcel Mauss a écrit à ce propos : « Bien que ces idées soient peu à la mode, je reste partisan de l'emploi, non métaphysique, de l'idée de progrès. Et, sans rien préjuger de la valeur absolue, je crois qu'on peut parler d'un certain progrès général de la race et de la mentalité humaines. Par progrès, nous entendrons, si vous le voulez bien, l'augmentation en quantité et en qualité, sans plus, les deux étant inséparables. »<sup>5</sup>

Pour François Vatin, il faut remettre dans le contexte ces idées défendues par Marcel Mauss. A son époque, on critiquait de plus en plus la technique, considérée comme inhumaine :

---

<sup>1</sup> Ibid., p230.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> François Vatin, « Marcel Mauss (1872 - 1950) et la défense de la technique moderne », in *L'espérance-monde*, p241.

<sup>4</sup> François Vatin, « Mauss et la technologie », *Revue du MAUSS* 2004/1 (no 23), p.418-433, p426.

<sup>5</sup> Marcel Mauss cité par François Vatin, « Mauss et la technologie », *Revue du MAUSS* 2004/1 (no 23), p.418-433, p426.

« Cette dénonciation humaniste de la technique fleurissait, on l'a rappelé, dans la France de l'entre-deux-guerres. Comme le jeune Georges Friedmann alors, Marcel Mauss voit, dans cette mise en accusation de la technique, un renoncement réactionnaire à l'idée de progrès. »<sup>1</sup>

La démonstration que la technique est universelle en faisant le détour par les techniques du corps permettait de contrer cet argument.

François Vatin cite Francis Bacon (1620), *Nouvel Organum*, pour qui la technique est plus naturelle donc plus universelle que la politique, et donc lui est supérieure<sup>2</sup>. Cette idée est reprise par Marcel Mauss, qui met donc la technique également au-dessus de l'économie<sup>3</sup> :

« En inscrivant – à la suite d'Espinas – la technique dans la corporéité, Mauss justifie donc le primat qu'il lui donne sur les autres manifestations de la vie sociale et notamment l'économique. »<sup>4</sup>

Dans son projet, François Vatin nous rappelle que Marcel Mauss fut inspiré par Henri Hubert et Alfred Espinas.

De plus, il inspira lui-même André Leroi-Gourhan, qui fut son élève<sup>5</sup>. Pour l'un comme pour l'autre, le corps est la première des techniques<sup>6</sup>. André Leroi-Gourhan développa cette idée dans *Le geste et la parole*, dont la thèse est que « (...) la technique est à l'origine de tout le processus d'hominisation. »<sup>7</sup>

### 3. Matière, milieux et tendance chez André Leroi-Gourhan

#### *a) Milieu intérieur et milieu extérieur*

Considérant les groupes humains, André Leroi-Gourhan opposa leur milieu extérieur à leur milieu intérieur. D'un côté, le milieu extérieur regroupe « milieu géographique, climatique,

---

<sup>1</sup> François Vatin, « Marcel Mauss (1872 - 1950) et la défense de la technique moderne », in *L'espérance-monde*, p247-248.

<sup>2</sup> François Vatin, « Mauss et la technologie », *Revue du MAUSS*, 2004/1 (no 23), p.418-433, p422 et p423.

<sup>3</sup> Ibid., p424.

<sup>4</sup> Ibid., p428.

<sup>5</sup> Bruno Karsenti, Ibid., p228.

<sup>6</sup> Ibid.

<sup>7</sup> François Vatin, « Marcel Mauss (1872 - 1950) et la défense de la technique moderne », in *L'espérance-monde*, p244.

animal et végétal »<sup>1</sup> ainsi que tout ce qui vient (objets ou idées) de l'extérieur du groupe humain étudié<sup>2</sup>. Le milieu extérieur représente en quelque sorte l'espace<sup>3</sup>, et André Leroi-Gourhan le définit comme inerte<sup>4</sup>.

Au contraire, le milieu intérieur est vivant<sup>5</sup>. Il est l'équivalent de la culture et de l'environnement social et contient les « traditions mentales »<sup>6</sup> et ressources d'ordre politique qui contribuent à former la conscience ethnique du groupe<sup>7</sup>. Bien que le milieu intérieur soit instable, langue, religion et formation sociale en sont les éléments les plus stables<sup>8</sup>.

Le milieu technique d'un groupe en particulier, qui est constitué de matériaux qui vont être transformés en objets, peut être intérieur ou extérieur<sup>9</sup>. Les objets techniques se trouvent « au point de contact entre milieu intérieur et milieu extérieur »<sup>10</sup>.

De plus, le milieu technique est perméable<sup>11</sup> : « (...) Les éléments techniques réagissent constamment les uns sur les autres. »<sup>12</sup>. Plus il est perméable, plus on s'approche de l'organisation industrielle. Moins il est perméable, plus on se rapproche du stade « très rustique »<sup>13</sup>.

### *b) Interactions entre la tendance, le milieu intérieur et le milieu extérieur*

De manière générale, milieux intérieur et extérieur déterminent les conditions matérielles dans lesquelles évolue un groupe ethnique. Si l'on se place au niveau des techniques, qui

---

<sup>1</sup> André Leroi-Gourhan (1945), *Milieu et techniques*, Paris : A. Michel, 1973, p333.

<sup>2</sup> Ibid., p333-334.

<sup>3</sup> Ibid., p396.

<sup>4</sup> Ibid., p334.

<sup>5</sup> Ibid., p334.

<sup>6</sup> Ibid., p336.

<sup>7</sup> Ibid., p341.

<sup>8</sup> Ibid., p342.

<sup>9</sup> Ibid., p333.

<sup>10</sup> Ibid., p339.

<sup>11</sup> Ibid., p343.

<sup>12</sup> Ibid., p344.

<sup>13</sup> Ibid., p373.

sont une transformation de la matière, c'est la tendance qui détermine l'évolution du groupe technique<sup>1</sup>. L'intention technique est d'établir un contact avec la matière<sup>2</sup>. L'objet conçu symbolise la réponse de la matière à cette intention : « Dans tous les cas qu'on puisse saisir au niveau de l'objet, l'intention technique apparaît comme cherchant une prise de plus en plus efficace sur le milieu extérieur et l'objet marque la limite à partir de laquelle le milieu extérieur annule l'effet libre du milieu intérieur. »<sup>3</sup>

Les interactions entre tendance, milieu intérieur et milieu extérieur peuvent se comprendre comme un aller-retour entre groupe humain et matière. Tous deux s'échangent alternativement le rôle principal :

« Le milieu technique, traversé par la tendance et sollicité par le milieu extérieur, est le champ de réactions complexes qui se matérialisent dans le groupe technique. L'objet, suivant le point de vue de l'observateur, apparaît comme une réponse à l'excitation du milieu extérieur ou une attaque du milieu technique sur la matière.

Il serait vain de trancher : que la matière provoque le milieu intérieur ou que celui-ci aille fouiller le terrain, qu'il y ait un réflexe de création ou un acte libre, peu importe à notre niveau ; l'essentiel pour nous est qu'un acte se produise souvent *comme* une réponse et souvent aussi *comme* une véritable expansion volontaire du milieu interne. La vérité moyenne est sans doute dans des actes où le milieu extérieur et le milieu intérieur prennent alternativement le pas pour atteindre un but unique. »<sup>4</sup>

André Leroi-Gourhan fait lui aussi preuve d'une forme de progressisme lorsqu'il suppose que plus on avance dans le temps, plus les matières utilisées pour faire des objets techniques sont efficaces<sup>5</sup>. Les intentions successives d'un groupe mènent à des inventions progressives, où le rendement augmente à chaque fois<sup>6</sup> : « L'action technique bénéficie par conséquent de l'évolution du *milieu technique*. »<sup>7</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid., p347.

<sup>2</sup> Ibid., p385.

<sup>3</sup> Ibid., p387.

<sup>4</sup> Ibid., p369.

<sup>5</sup> Ibid., p310.

<sup>6</sup> Ibid., p397.

<sup>7</sup> Ibid., p310.

## 4. La matière et nous chez les sociologues de l'innovation. Exemples

Quelques années après André Leroi-Gourhan, les sociologues de l'innovation réunis autour de Bruno Latour, Madeleine Akrich et Michel Callon ont étudié les objets techniques en tentant de notamment de donner un rôle différent à la matière dont ils sont composés. Pour ce faire, ils tentèrent de dépasser le dualisme entre style (c'est-à-dire société ou « milieu intérieur ») et fonction (c'est-à-dire technique)<sup>1</sup>. Leur point de départ est de « ne pas considérer les objets comme des objets, mais comme des partenaires associés aux humains »<sup>2</sup>. Dans leur ouvrage en commun, Bruno Latour et Pierre Lemonnier écrivent en introduction : « La société n'est pas faite d'une autre matière que la matière justement des pots, des bois, des plantes ou des rocs. Dans une telle approche, l'objet ne sert plus d'écran à la société, il la traduit, la déplace, la transforme. »<sup>3</sup>

Pour mieux comprendre leur propos, nous donnons ici deux exemples de leurs travaux, l'un qui concerne l'étude des coquilles Saint-Jacques dans la baie de Saint-Brieuc, l'autre le développement des voitures électriques à la fin des années 1970 en France.

### *a) Exemples d'anthropologie symétrique. Travaux de Michel Callon*

#### *1. Les coquilles Saint-Jacques de Michel Callon*

##### *a) Critique de la sociologie*

Le texte de Michel Callon sur les coquilles Saint-Jacques de la baie de Saint-Brieuc en 1974 est une illustration de ce que peut être l'anthropologie symétrique défendue par les sociologues de l'innovation<sup>4</sup>. Il commence par une critique des sociologues pour qui la société est la cause ultime permettant d'expliquer tout phénomène humain et où la nature est

---

<sup>1</sup> Pierre Lemonnier et Bruno Latour (1994), *L'intelligence des techniques*, Paris : La Découverte, p13.

<sup>2</sup> Bruno Latour, « Lettre à mon ami Pierre sur l'anthropologie symétrique », *Ethnologie française*, T. 26, No. 1, « Culture matérielle et modernité » (Janvier-Mars 1996), pp. 17-31, Presses Universitaires de France, p34.

<sup>3</sup> Pierre Lemonnier et Bruno Latour, *Ibid.*, p16.

<sup>4</sup> Michel Callon, « La domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc », *L'année sociologique*, 1986, 36.

malheureusement mise de côté. Au-delà de cette lacune, Michel Callon releva trois autres problèmes.

Le premier est que paradoxalement, les sociologues n'analysent pas les discours des scientifiques sur la société, leurs discours n'étant étudiés que lorsqu'ils parlent de la nature. Michel Callon l'explique par l'idée que selon eux, seul un sociologue peut parler de la société. Quand un scientifique, autre que sociologue, parle de société, cela ressemblerait à une forme de déviance sur laquelle le sociologue ferme peureusement les yeux. Pour Michel Callon, cela ressemble à de la censure et peut aboutir à la lecture d'un texte où les scientifiques sont décrits comme des personnes sans aucune conscience de l'environnement qui les entoure.

Le deuxième problème est que la sociologie, comme toutes les disciplines scientifiques, est le siège de controverses. Michel Callon nota qu'alors qu'il n'y a pas de consensus pour expliquer les controverses des autres disciplines scientifiques, il n'y a pas de raison logique pour que cet état échappe à la sociologie. L'argument selon lequel nature et société ont le même poids dans l'explication, même s'il ne fait pas l'unanimité, doit donc être entendu.

Le troisième problème réside dans le caractère incertain de la société d'un côté, celui des sciences et des techniques de l'autre, qui imposent de traiter le tout de manière symétrique.

La solution proposée par Michel Callon consiste à laisser parler les savants étudiés aussi bien de science et de technique que de société, ce qui lui permet d'observer de manière plus complète la modélisation qu'ils font de leur environnement, et notamment observer leurs pratiques de « traduction » et de « purification ».

#### *b) Présentation des différents acteurs*

Le monde social décrit dans l'article de Michel Callon est composé de quatre types d'acteurs : les marins pêcheurs de Saint-Brieuc qui pêchent des coquilles Saint-Jacques avec une rationalité économique banale, ne pensant qu'au court-terme ; trois chercheurs, reconnus

comme ceux qui en savent le plus sur les coquilles Saint-Jacques, surtout sur les méthodes de culture intensive de coquilles Saint-Jacques au Japon ; la communauté scientifique, c'est-à-dire les collègues de ces trois chercheurs, et les coquilles Saint-Jacques elles-mêmes.

Les coquilles Saint-Jacques de Saint-Brieuc ont la particularité de n'être coraillées que six mois pendant l'année, par opposition à d'autres variétés de coquilles Saint-Jacques coraillées toute l'année. Or il se trouve que les consommateurs préfèrent les coquilles Saint-Jacques coraillées. Les marins pêcheurs des régions où elles sont coraillées toute l'année les ont donc toutes pêchées, sans pouvoir attendre qu'elles se reproduisent et donc tarissant leur source de coquilles Saint-Jacques. Ce ne fut pas le cas à Saint-Brieuc, puisqu'ils ne les pêchaient que six mois sur douze, les six mois restant leur laissant le temps de se reproduire. Cette caractéristique des coquilles Saint-Jacques de Saint-Brieuc est donc un mal pour un bien.

Pour Michel Callon, la question de recherche posée par tous les acteurs, y compris par les coquilles Saint-Jacques, est : comment cultiver les coquilles Saint-Jacques intensivement ? La solution proposée par les trois chercheurs consiste à fixer les larves de coquilles sur des supports installés à l'écart de l'environnement extérieur (la mer), dans des sortes de parcs ou fermes aquatiques. Il y a eu symétrie dans le rôle que tous les acteurs impliqués ont joué pour arriver à cette découverte.

Chacun des acteurs avait a priori un intérêt à ce que ce travail des trois chercheurs se fasse : pour eux l'intérêt était évident puisqu'ils défendaient leur travail. Pour les coquilles Saint-Jacques, elles allaient pouvoir se reproduire à l'abri des prédateurs et se faire cultiver intensivement, comme tout le monde.

### *c) Intérêts divergents des différents acteurs*

Selon Michel Callon, une controverse scientifique se déroule en quatre étapes : 1. Problématisation, 2. Intéressement, 3. Enrôlement, 4. Mobilisation. Ces quatre étapes concernent aussi bien la relation {trois chercheurs ; communauté scientifique} que la relation {trois chercheurs ; marins pêcheurs} ou la relation {trois chercheurs ; coquilles Saint-Jacques}.

### *1. Problématisation*

La première étape, la problématisation, est l'étape qui consiste à se rendre indispensable. Ce que recherchent tous les acteurs, seuls les trois chercheurs peuvent leur amener. Libre ensuite aux acteurs d'accepter la problématisation des trois chercheurs.

### *2. Intéressement*

La deuxième étape, l'intéressement, est l'étape qui consiste à stabiliser la problématisation et à la faire accepter par les acteurs. Pour qu'ils l'acceptent, ils doivent se couper de certains liens qui peuvent entraver l'acceptation de la problématique, ce qui modifie leur identité. Les moyens pour nouer de nouvelles relations et en couper d'autres peuvent être la simple sollicitation, la force ou la séduction.

#### *a) Intéressement des coquilles Saint-Jacques*

Le dispositif utilisé pour produire intensivement des coquilles Saint-Jacques est un exemple d'« intéressement » auquel les coquilles Saint-Jacques étaient sensibles car il les protège des prédateurs (étoiles de mer, courants marins, dragues des marins pêcheurs) lorsqu'elles sont à l'état de larves. Le fait que les larves arrivent à se reproduire dans ce dispositif a confirmé qu'elles étaient intéressées par lui.

#### *b) Intéressement des marins pêcheurs*

Trouver une alternative à l'exploitation économique non viable sur le long terme des coquilles Saint-Jacques est ce qui intéressait les marins-pêcheurs. Jusqu'à l'intervention des trois chercheurs, ils les pêchaient sans leur laisser le temps de se reproduire. La survie économique des marins pêcheurs était donc menacée par leurs actions non éclairées.

#### *c) Intéressement de la communauté des scientifiques*

Il n'y avait alors pas de connaissances scientifiques sur les coquilles Saint-Jacques. Il n'était pas possible, pour tout scientifique qui se respecte, de laisser un tel trou dans l'état des

connaissances, car cela va à l'encontre de sa mission. A partir du moment où les trois chercheurs les sensibilisèrent à cette question, l'intérêt de la communauté scientifique suivit.

### *3. Négociation*

La problématisation s'accompagne d'hypothèses qui sont l'annonce d'un programme de négociation. C'est la négociation avec les coquilles Saint-Jacques qui fut le plus long et compliqué pour les trois chercheurs. Celles-ci ne se sont laissées pas faire. Les trois chercheurs devaient négocier avec les précédentes relations des coquilles Saint-Jacques (visiteurs, courant marins) de manière à imposer leur technique.

### *4. Acceptation*

En ce qui concerne l'acceptation, qui doit normalement suivre la négociation, celle-ci passait pour les scientifiques par la démonstration du fait « fixation de la larve » grâce à des travaux scientifiques antérieurs. Un phénomène intéressant fut observé par les trois chercheurs : lorsqu'ils exposèrent ce fait, qui était une découverte, on leur trouva d'emblée des précurseurs, que ce soit des membres de la communauté scientifique ou de la communauté des marins pêcheurs, qui, une fois la démonstration faite, pouvaient montrer des faits observés antérieurement qui la soutenaient.

#### *d) Traduction / Trahison. La faiblesse des représentants*

Les larves qui se sont fixées représentaient-elles l'ensemble des larves ? Les scientifiques répondirent oui, ce qui permettait de dire que de manière générale, les larves se fixaient. Les délégués syndicaux des marins pêcheurs acceptèrent également les résultats, au nom de l'ensemble des marins pêcheurs. Cela ne signifiait pas pour autant que toutes les larves se fixaient, et que tous les marins pêcheurs l'acceptaient. Michel Callon compara ce processus au fonctionnement d'une démocratie. Dans les deux cas, cela fonctionne sur la mobilisation : il faut rendre mobiles tous les acteurs à intéresser pour les faire atteindre le même but. Un marin pêcheur se déplace au bureau de vote, et se transforme en bulletin de vote, puis en délégué syndical, pour finir dans un amphithéâtre du Centre Océanographique de Brest.

Une coquille Saint-Jacques est déplacée sur un collecteur, puis, si elle se fixe, est transformée en chiffre, pour finalement rejoindre les marins pêcheurs dans l'amphithéâtre. Michel Callon précise que les acteurs dont on discute dans cet amphi ne sont pas des points de départ, mais des résultats. Voici la nouvelle réalité sociale et naturelle construite par les trois chercheurs :

« *Pecten Maximus* existe en tant qu'espèce dont les larves se fixent ; les marins-pêcheurs veulent le repeuplement et sont prêts à soutenir le programme d'expérimentation ; les collègues admettent la validité des résultats obtenus. »<sup>1</sup>

Tout ce processus, Michel Callon le nomme *traduction*, et ajoute que compte-tenu de ce qu'elle est, il est fort possible qu'elle se transforme en trahison<sup>2</sup> :

« Traduire c'est déplacer : les trois chercheurs, inlassablement s'efforcent de déplacer leurs alliés pour les faire passer par Brest et par leur laboratoire. Mais traduire, c'est également exprimer dans son propre langage ce que les autres disent et veulent, c'est s'ériger en porte-parole. »<sup>3</sup>

L'enjeu le plus important porte sur les coquilles Saint-Jacques : les trois chercheurs les ont-ils bien caractérisées ? Parmi l'ensemble des coquilles Saint-Jacques, ont-ils choisi le bon porte-parole ? Car si ce n'est pas le cas, l'intérêt des marins pêcheurs et des collègues scientifiques pour leurs travaux disparaîtra. L'enjeu est également économique, car cela pourrait menacer la pêche des coquilles Saint-Jacques dans la baie de Saint-Brieuc. Malheureusement lorsque la première expérience aboutissant à la découverte que les coquilles Saint-Jacques se fixaient fut reproduite, les coquilles Saint-Jacques ne se fixaient pas. Deux ans après la première expérience, ils recommencèrent à pêcher les coquilles Saint-Jacques comme ils le faisaient avant. L'article de Michel Callon se termine ainsi :

« Le choix du répertoire de la traduction n'a pas pour seule ambition de donner une description symétrique et tolérante du processus complexe mélangeant réalités sociales et naturelles. Il permet aussi d'expliquer comment s'établit le silence du plus grand nombre qui assure à quelques-uns la légitimité de la représentativité et le droit à la parole. »<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> Ibid., p205.

<sup>3</sup> Ibid., p204.

<sup>4</sup> Ibid., p205. Michel Callon n'a pas cherché à expliquer pourquoi les trois chercheurs avaient choisi les coquilles Saint-Jacques qui se fixent comme porte-parole de l'ensemble des coquilles Saint-Jacques. De même, nous ne savons pas vraiment pourquoi les délégués syndicaux des marins pêcheurs ont accepté la découverte des chercheurs.

D'après le journal *Les Echos* du 24 novembre 2014, les ventes de coquilles Saint-Jacques prévues pour Noël furent compromises car une toxine ravagea les cultures et les rendirent impropres à la consommation. Dans l'article, le réchauffement de l'eau et l'évolution du milieu à cause du développement urbain sont considérés comme les

## 2. Le véhicule électrique de Michel Callon

En plus des coquilles Saint-Jacques, Michel Callon étudia symétriquement un autre type d'objets ou, pour reprendre l'expression de ses collègues, de « non-humains », à savoir les voitures électriques équipées en piles à combustible de la fin des années 1970. Il s'intéressa à leur développement empêché et trouva que plusieurs groupes d'acteurs s'y opposèrent, dans le domaine scientifique, industriel et matériel.

Au sein de la communauté scientifique, il y avait des désaccords parmi les spécialistes de l'électrochimie. Les électrochimistes sont ceux qui travaillaient sur la conception des piles. Leur discipline n'était alors pas reconnue comme telle. Pour ce faire, Michel Callon pense qu'il aurait fallu qu'elle s'intéresse à d'autres applications industrielles que celles des piles électriques.

Michel Callon trouva un autre frein industriel dans les réticences des constructeurs automobiles et de l'Etat. Le marché du véhicule électrique n'était pas clairement défini et n'avait pas vraiment sa place. La stratégie industrielle des constructeurs automobiles vis-à-vis des véhicules électriques était inadaptée car ils souhaitaient consolider le marché des véhicules thermiques en en vendant autant que possible.

D'un point de vue matériel, la maîtrise de la catalyse, à la base du fonctionnement des piles à combustible, posait problème. Ces piles n'étaient techniquement pas prêtes pour être commercialisées de manière rentable. De plus, les catalyseurs, « des matériaux précieux »<sup>1</sup>, coûtaient trop cher.

Nous pensons qu'il aurait été intéressant que soient mentionnées dans l'article les autres techniques concurrentes des piles à combustible, que ce soit dans le domaine des transports en général ou dans le domaine de la production d'électricité. De plus, l'efficacité et les

---

premiers responsables du développement de la toxine. Le dispositif de culture intensive mis en place par les scientifiques évoqués par Michel Callon était-il également en cause ?

<sup>1</sup> Michel Callon, « L'État face à l'innovation technique : le cas du véhicule électrique », *Revue française de science politique*, 29<sup>ème</sup> année, n°3, 1979, pp. 426-447, p430.

contraintes propres à l'électrochimie, à la catalyse ou à la pile à combustible ne sont pas évoquées dans le détail. Ceci nous aurait permis de mieux comprendre comment le lien entre choix techniques et choix socio-économiques s'est établi.

De plus, dans cette histoire de commercialisation ratée des véhicules électriques à la fin des années 1970, EDF incarnait pour certains la rationalité scientifique face à l'irrationalité politique. Cette attribution de rôle à EDF est possible car elle se retrouve seule face à l'Etat, étant donné que les autres industriels ont quitté le projet de développement du véhicule électrique. Mais n'est-ce pas parce que la rationalité d'EDF, qui n'est peut-être pas si scientifique, s'oppose à la rationalité d'autres industriels, que ces derniers se retrouvent exclus du débat ? Comme Michel Callon l'explique, l'entreprise d'Etat bloqua la recherche dans les piles chaudes car elles pouvaient être utilisées dans « des petites centrales capables d'alimenter en électricité des villes moyennes »<sup>1</sup>, à la différence des centrales nucléaires qui desservent un territoire beaucoup plus grand. EDF obtint gain de cause et les subventions n'allèrent plus qu'aux piles froides, utilisables dans le domaine de la traction de véhicules. Ainsi, pourquoi EDF n'incarnerait-elle pas l'irrationalité politique face à la rationalité scientifique, surtout lorsque l'on sait qu'EDF était une entreprise d'Etat ? La réponse se trouve peut-être dans le rôle joué par la DGRST (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique), citée par Michel Callon ainsi :

« La politique gaullienne qui fait de la science un des atouts majeurs du maintien de l'indépendance nationale, va permettre à la DGRST d'établir solidement son influence et son pouvoir au sein de l'appareil d'Etat. »<sup>2</sup>

Quoiqu'il en soit, reprenant une expression de Pierre Lemonnier, il apparaît que le projet de recherche des sociologues de l'innovation consiste à qualifier d'humains ceux qui ressemblent aux êtres du même nom et de non-humains ceux qui ressemblent à des objets, et à qualifier le tout qu'ils forment de collectif et non plus de société. Partant de cette symétrie, ils y étudient les dynamiques en jeu<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Ibid., p430.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> Pierre Lemonnier, « Et pourtant ça vole ! L'ethnologie des techniques et les objets industriels », *Ethnologie française*, T. 26, No. 1, « Culture matérielle et modernité » (Janvier-Mars 1996), pp. 17-31, Presses Universitaires de France, p23.

## 5. La matière puis nous chez Pierre Lemonnier

Comme ses collègues précédemment évoqués, Pierre Lemonnier donne lui aussi dans ses travaux un rôle central à la matière :

« Par définition, tout acte technique passe par la rencontre d'une matière – dont le comportement répond à des lois universelles - avec les procédés physiques particuliers qui ont cours dans une culture donnée. »<sup>1</sup>

Néanmoins, il considère que la matière et la contrainte qu'elle impose à l'homme sont indépassables. Il reproche ainsi aux sociologues de l'innovation de ne pas suffisamment prendre en compte la matière, qui a une réalité que l'on peut situer dans le temps et dans l'espace et qui impose une contrainte que le sociologue ou l'anthropologue ne peuvent ignorer.

Dans la construction des avions par exemple, Pierre Lemonnier constate que les formes originales ne sont pas retenues et se demande pourquoi : est-ce parce qu'elles manquent d'efficacité ou est-ce parce qu'elles ne sont pas à la mode et donc ne correspondent pas à la représentation classique que la majorité se fait d'un avion ? Pierre Lemonnier prend l'exemple de l'avion « canard », connu depuis les débuts de l'aviation, qui est plus rapide, plus sécurisé, bien que moins stable que la forme classique des avions. Il considère que cet inconvénient n'est pas la cause de l'échec apparent de l'avion « canard » car les ingénieurs ont réussi à faire voler des appareils « autrement plus instables » que lui<sup>2</sup>. Il considère plutôt que l'explication tient dans le fait que la forme de l'avion « canard » était différente de la forme de l'avion qui permit de traverser la Manche pour la première fois en 1909, forme qui elle devint la forme retenue comme classique. Pourtant, avec le temps, les avions « canards » ont finalement été reconnus comme étant plus efficaces. Cette reconnaissance a commencé

---

<sup>1</sup> Pierre Lemonnier, « Choix techniques et représentations de l'enfermement chez les Anga de Nouvelle-Guinée. Ethnologie et technologie » in Pierre Lemonnier et Bruno Latour (1994), *L'intelligence des techniques*, Paris : La Découverte, p254.

<sup>2</sup> Pierre Lemonnier, « Et pourtant ça vole ! L'ethnologie des techniques et les objets industriels », *Ethnologie française*, T. 26, No. 1, « Culture matérielle et modernité » (Janvier-Mars 1996), pp. 17-31, Presses Universitaires de France, p20.

au moment où Pierre Lemonnier a écrit son article, au milieu des années 1990. Il y pronostiquait même, sur la base de projets industriels récents, que dans quelques siècles, ces avions « pourront paraître s'être imposés rapidement. »<sup>1</sup>

Enfin, l'argument de Pierre Lemonnier est que si l'on place l'analyse dans un temps court, on peut considérer que le progrès n'a pas lieu puisque l'on observe que la forme technique immédiatement reconnue n'est pas la plus rationnelle et efficace disponible sur la période. Cependant, si l'on place l'analyse dans un temps plus long, force est de reconnaître que le progrès en temps qu' « accroissement du contrôle des hommes sur de larges domaines du monde naturel »<sup>2</sup> existe. Et de conclure : « La lancinante question de l'ethnologie des techniques est alors, encore et toujours, de comprendre comment la tendance peut s'imposer malgré le brouillamini de déterminants non matériels des actions sur la matière. »<sup>3</sup>

Nous retrouvons ici l'idée d'évolution technique développée par André Leroi-Gourhan et brièvement décrite précédemment.

Certains sociologues de l'innovation, et Bruno Latour plus particulièrement, considère que sans forcément nier la contrainte imposée par la matière, la prendre comme point de départ d'une analyse est non seulement impoli à l'égard de tout ce qui est autre, mais de plus empêche de comprendre l'autre. En effet, « En élargissant leur domaine d'enquête, les ethnologues ont constaté que les produits les plus sophistiqués de nos industries de pointe ne sont pas moins enchevêtrés dans des réseaux de significations et de relations sociales que les plus élémentaires actions sur la matière rencontrées dans une population sans industrie. »<sup>4</sup> Ils suggèrent à la place de faire de l'anthropologie symétrique, où humains et non humains, sujets et objets, sont considérés comme égaux. Pierre Lemonnier, louant les travaux de ses collègues, considère pourtant que cette contrainte éthique peut s'avérer embarrassante pour penser la différence.

---

<sup>1</sup> Pierre Lemonnier, *ibid.*, p21.

<sup>2</sup> Pierre Lemonnier, *ibid.*, p21.

<sup>3</sup> Pierre Lemonnier, *ibid.*, p22.

<sup>4</sup> Pierre Lemonnier, *ibid.*, p17.

## A) Quand la distance ne comptait pas : premiers calculs de rendement des moteurs électriques (1840 – 1873)

### II. Première catégorie de moteurs

#### 1. Concurrence entre machines à vapeur et moteurs électriques

La nouvelle source d'énergie que représentait l'électricité au 19<sup>ème</sup> siècle fut l'objet d'attentes très grandes au niveau de son utilisation industrielle. Louis Figuier (1819 – 1894), vulgarisateur scientifique, décrit dans cet extrait l'état d'esprit de l'époque :

« Pendant notre siècle, la machine à vapeur, en abaissant le prix de chaque chose, a opéré dans l'industrie une révolution absolue. Mais la machine à vapeur peut être détrônée. Elle peut être remplacée par un moteur encore plus économique. Si l'on parvient à créer un moteur n'occasionnant presque aucune dépense, si l'on peut utiliser avantageusement les forces gratuites que nous offre la nature, comme les chutes d'eau, la pesanteur, les vents et les marées ; si l'on obtient, en un mot, de la force à bas prix, quelle révolution dans l'industrie et consécutivement dans la société ! Il n'y aura plus ni riche, ni pauvre ; on ne verra de différence entre les hommes que celles qu'établiront la sagesse, le travail et l'esprit de conduite. L'âge d'or, rêvé par l'imagination des poètes, sera réalisé par le génie des savants. »<sup>1</sup>

En 1886, Thomas C. Martin présenta une note sur l'histoire des moteurs électriques devant les membres d'une association d'industriels électriciens nord-américains, la *National Electric Light Association* (NELA). Il rappela qu'à cette date il y avait des moteurs électriques cachés dans des endroits auxquels on ne pensait pas, comme par exemple dans les télégraphes ou dans les téléphones, pour déclencher la sonnerie. Depuis le début du siècle, l'électricité était déjà utilisée pour les communications dans les télégraphes. Puis vint l'éclairage, et enfin la force motrice. Les industriels utilisaient déjà d'autres formes d'énergie telles que la vapeur, le gaz, l'air (comprimé) ou l'eau. Mais contrairement à l'électricité, le transport sur de longues distances coûtait trop cher. L'inconvénient des machines à vapeur était qu'elles étaient reliées aux machines qu'elles mettaient en marche avec des arbres de transmission et

---

<sup>1</sup> Louis Figuier (1884), *Les nouvelles conquêtes de la science. L'électricité* / par Louis Figuier, Paris : Librairie illustrée, p463.

des poulies, sources de nombreux frottements et de perte d'énergie. Le moteur électrique permettait de supprimer ces intermédiaires puisque chaque machine-outil pouvait avoir son propre moteur. Dans la description d'un projet d'utilisation d'une chute d'eau située à Montmorency, à 11 km de Québec, afin de produire de la force motrice électrique, dont les premiers travaux commencèrent en 1885, on donna le jugement suivant sur les courroies et leur caractère obsolète : « Tout, dans l'usine, est construit d'une manière durable ; on n'y a admis aucune courroie. »<sup>1</sup> Ainsi, le danger et l'encombrement lié aux courroies étaient évités, et il devenait plus simple de déplacer les machines-outils. Avec les moteurs électriques, il était aussi possible de diviser et de répartir la puissance sur une plus grande surface. Si l'usine avait sa propre centrale électrique, elle pouvait également utiliser le courant pour l'éclairage. Enfin, les durées d'utilisation étaient mieux contrôlées grâce aux mises en marche et arrêts faciles (interrupteur). La consommation d'énergie était ainsi mieux proportionnée au travail à effectuer. En effet l'autre intérêt des moteurs électriques était qu'ils étaient capables de fournir de faibles puissances permettant de réaliser divers travaux. Les petits moteurs électriques étaient installés dans de petits ateliers où l'on utilisait auparavant le travail des hommes ou des animaux. Le bois, le métal, le papier, le tissu, le lait, le pain, la viande, etc., allaient enfin être disponible en larges quantités. Le moteur électrique permettait d'intensifier leur production. Entre 1885 et la Première Guerre Mondiale, les industries grandes consommatrices de force motrice étaient l'industrie textile, minière, du bois, du papier, alimentaire, la métallurgie et la marine. Ce fut au sein de ces dernières que furent installés les premiers moteurs électriques. Une autre des premières utilisations des moteurs électriques fut le transport de la puissance hydraulique naturelle depuis les montagnes vers les zones industrielles environnantes.

---

<sup>1</sup> « Chronique : Utilisation de la force motrice de l'eau pour l'éclairage électrique », *La Lumière Electrique*, Volume 19, n°4, 23 janvier 1886, p180.

## 2. Premiers principes de fonctionnement d'un moteur électrique au 19<sup>ème</sup> siècle. Le télégraphe Morse comme nouvelle espèce technique. Concept d' « imitation » de Gabriel Tarde

### a) Aimantation du fer et de l'acier. Les électro-aimants

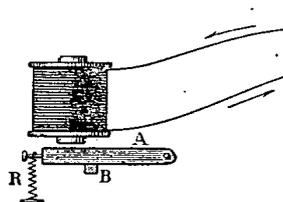
En 1824, le physicien français François Arago (1786 – 1853) a découvert au cours d'une expérience que si l'on place un fil conducteur dans lequel passe un courant électrique, perpendiculairement à un barreau de fer ou d'acier, ce barreau s'aimante. Avec un barreau en fer, l'aimantation disparaît lorsque le courant s'arrête alors qu'avec un barreau en acier, l'aimantation se maintient.

Le physicien français André-Marie Ampère (1775 – 1836) alla plus loin en enroulant le fil conducteur autour du barreau de fer, ce qui produisit une aimantation plus forte du barreau. Les physiciens notèrent également que l'aimantation augmentait avec l'intensité du courant qui traversait le fil.

A partir de cette expérience, on qualifia de *noyau* le barreau de fer entouré du fil et de *spires* le nombre de tours que le fil faisait autour du barreau. On parla d'*électro-aimant* pour qualifier l'aimant temporaire ainsi obtenu. Un électro-aimant est donc simplement un morceau de fer initialement non aimanté autour duquel est entouré un fil dans lequel circule un courant. Quand le courant électrique circule dans le fil, le morceau de fer s'aimante et se transforme en électro-aimant.

### b) Armature

La force attractive d'un aimant quel qu'il soit permet de générer un mouvement mécanique. Soit le dispositif tel que représenté dans la figure ci-dessous :

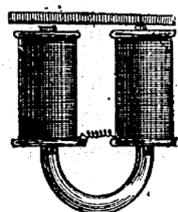


On reconnaît en haut, vertical, un électro-aimant composé d'un noyau de fer entouré d'un fil conducteur à travers lequel passe un courant électrique. En dessous de l'électro-aimant, horizontal, se trouve un barreau de fer non aimanté, relié à un ressort. Les phénomènes suivants se produisent alors :

- Lorsque le courant passe dans le fil conducteur, le noyau de l'électro-aimant s'aimante ; le barreau de fer horizontal se trouve alors attiré par le pôle de l'aimant et se déplace jusqu'à lui.
- Lorsque le courant est interrompu, l'aimantation du noyau de l'électro-aimant disparaît ; le barreau de fer retrouve sa place horizontale initiale, du fait de sa liaison avec le ressort.

On qualifia d'*armature* le barreau de fer placé horizontalement sous l'électro-aimant. Un article de la revue *La Lumière Electrique*<sup>1</sup> nous apprend que ce terme « armature » a d'abord été utilisé par les Anglais, pour qui « arm » signifie « bras ». Les premiers moteurs électriques étaient construits sur ce principe : une armature en fer était attirée puis repoussée par plusieurs électro-aimants.

Ci-dessous un schéma représentant un électro-aimant en forme de U placé sous l'armature :



Quand le courant circulait dans une des bobines, l'armature s'en approchait ; quand il ne circulait plus et qu'il se mettait à circuler dans la bobine à côté, l'armature s'éloignait de la première bobine et était attirée par la deuxième. L'arbre du moteur, relié à l'armature, était mis en mouvement par ce jeu des courants. Cette alternance était rendue possible grâce à un interrupteur.

---

<sup>1</sup> « Machine dynamo-électrique de M. Weston », *La Lumière Electrique*, Volume 1, n°9, 1er novembre 1879, p172-173.

### *c) Application de ces principes au fonctionnement d'un télégraphe Morse*

En 1820, André Ampère réalisa une expérience démontrant que la déviation d'une aiguille était la même en tout point d'un circuit électrique, même à grande distance de la source de courant, une pile. Ses mémoires sur le sujet furent présentés les 18, 25 septembre et 2 octobre 1820 à l'Académie des Sciences. Le télégraphe Morse reposait sur ce principe, ainsi que celui de l'aimantation temporaire du fer précédemment décrit et de l'induction que nous décrirons plus loin. Il était constitué de deux circuits, un circuit émetteur alimenté par une pile, et un circuit récepteur. Un électro-aimant, relié au circuit émetteur, attirait ou repoussait une armature reliée au circuit récepteur, ce qui avait pour effet de fermer ou d'ouvrir ce circuit. Lorsque le courant de la pile était interrompu, l'électro-aimant n'était plus aimanté et l'armature se trouvait relâchée.

### **3. Analogie entre la construction des moteurs électrique et celle des machines à vapeur. Le piston, « élément technique » au sens de G. Simondon**

A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le sociologue Gabriel Tarde pensait que l'on pouvait expliquer les sociétés animales ou humaines avec le principe d'« invention imitée ». Il s'inspira d'une thèse d'un autre sociologue, Alfred Espinas, présentée en 1877 à la Sorbonne sur les fourmis où il remarqua qu'elles agissaient selon le « principe d'initiative individuelle suivie d'imitation »<sup>1</sup>. Selon Gabriel Tarde, pour repérer l'existence d'une société, il suffit d'observer s'il y a déjà eu imitation ou pas ; à partir du moment où un être humain en copie un autre, il y a société : « (...) l'être social, en tant que social, est imitateur par essence »<sup>2</sup>. L'imitation vient d'ailleurs selon lui avant l'échange économique<sup>3</sup>. Il repéra ainsi de multiples formes d'imitation dans le monde social : l'imitation-coutume, l'imitation-mode, l'imitation-sympathie, l'imitation-obéissance, l'imitation-instruction, l'imitation-éducation, l'imitation naïve, l'imitation

---

<sup>1</sup> Gabriel Tarde (1895), *Les lois de l'imitation*, Paris : Félix Alcan, p4.

<sup>2</sup> Ibid., p12.

<sup>3</sup> Ibid., p157.

réfléchi, etc. L'imitation en biologie était selon lui analogue à l'hérédité en biologie ou à la vibration en physique : toutes sont des répétitions.

L'imitation en sociologie était selon Gabriel Tarde analogue à l'hérédité en biologie ou à la vibration en physique : toutes sont des répétitions. Prenant l'exemple des techniques, pour lui, le télégraphe Morse est à la science sociale ce qu'une nouvelle espèce végétale est à la biologie<sup>1</sup>. Le télégraphe Morse a en effet été l'un des tout premiers moteurs électrique.

Une dizaine d'années avant lui, le philosophe des techniques allemand Ernst Kapp alla plus loin et énonça l'idée selon laquelle l'homme donne inconsciemment aux objets une forme déjà bien connue, celle de ses organes :

« Pour construire les machines, l'homme a dû faire retour inconsciemment sur lui-même. Pour disposer les éléments de la machine inerte pour qu'ils produisent une activité fonctionnelle convergente, il a dû aller chercher en lui-même le modèle de la totalité articulée vivante unitaire de l'organisme corporel. »<sup>2</sup>

Plus loin, il ajoute :

« La formation de l'outil précède la formulation de la loi, qui n'est aperçue et reconnue qu'ultérieurement. Elle se présente comme un legs inconscient que la forme porte en elle. En effet, la projection est par essence un processus progressif, en grande partie inconscient, d'auto-aliénation du sujet, dont les actes particuliers ne parviennent pas systématiquement à la conscience au moment où ils sont effectués. »<sup>3</sup>

Jusqu'en 1873, date à laquelle la dynamo Gramme fut inventée, la construction des premiers moteurs électriques eut notamment pour modèle les machines à vapeur :

« (...) L'aimant est en face de l'ouverture de la spirale ; il s'y précipite, et s'y enfonce profondément, comme le piston d'une machine à vapeur s'enfonce dans toute sa longueur dans le cylindre. En fait, les machines fondées sur ce principe, notamment celles de Bourbouze, de du Moncel et de l'Américain Page, ressemblent absolument à des machines à vapeur. »<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> Ernst Kapp (1877), *Principes d'une philosophie de la technique*, Traduit par Grégoire Chamayou, ancien élève de l'ENS LSH, agrégé de philosophie, enseignant à l'Université de Paris X – Nanterre, Vrin. Pour demain, p93.

<sup>3</sup> Ibid., p99.

<sup>4</sup> « L'électricité au foyer domestique », Revue *La Femme*, 15 février 1891, n°4, p30.

Le physicien et spécialiste des machines électrostatiques Noël Felici (1916 – 2010) nota lui aussi dans un article du *Bulletin d'histoire de l'électricité*<sup>1</sup> que les premiers moteurs électriques avaient été conçus avec pour modèle les machines à vapeur, alors déjà disponibles dans l'industrie. Les premiers ingénieurs électriciens lui ont repris le mécanisme du piston.

#### *a) Le piston comme élément technique, au sens de Gilbert Simondon*

Le philosophe Gilbert Simondon distingua trois étapes dans l'évolution des techniques : 1. *Élément technique*, 2. *Individu technique*, 3. *Ensemble technique*. Cette dernière étape lui permettait d'expliquer que les techniques peuvent déterminer le développement d'une société. Il était donc important selon lui de connaître le temps des techniques, qu'il nomma « temps de relaxation », pour comprendre les diverses étapes de l'évolution sociale. Il prit l'exemple de l'énergie : à partir de la machine à vapeur, « élément thermodynamique », on est passé à la concentration industrielle du 19<sup>ème</sup> siècle, et les individus s'y sont adaptés à tous les points de vue : « Ce temps de relaxation est le temps technique propre ; il peut devenir dominant par rapport à tous les autres aspects du temps historique, si bien qu'il peut synchroniser les autres rythmes de développement et paraître déterminer toute l'évolution historique alors qu'il en synchronise et entraîne seulement les phases. »<sup>2</sup>

Plus précisément, selon Gilbert Simondon, les éléments techniques sont ceux qui restent et se transmettent. Pour étendre la culture technique, c'est donc à eux qu'il faut s'intéresser : « Ni les ensembles techniques ni les individus techniques ne demeurent ; seuls les éléments ont le pouvoir de transmettre la technicité, sous forme effectuée, accomplie, matérialisée dans un résultat, d'une époque à une autre. Pour cette raison, il est légitime d'analyser l'objet technique comme consistant en individus techniques, mais il est nécessaire de préciser que l'élément technique, à certains moments de l'évolution, a un sens par lui-même, et est dépositaire de la technicité. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Noël J. Felici, « La préhistoire du moteur électrique », *Bulletin d'histoire de l'électricité*, n°5, juin 1985, p53 à 66.

<sup>2</sup> Gilbert Simondon (2012), *Du mode d'existence des objets techniques*, Editions Aubier, p84.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p95.

Selon Gilbert Simondon, contrairement aux organismes biologiques, quand un nouvel élément technique est créé, on peut en détacher un de ses organes pour créer une toute nouvelle lignée d'objets techniques : « Dans le domaine de la vie, l'organe n'est pas détachable de l'espèce ; dans le domaine technique, l'élément, précisément parce qu'il est fabriqué, est détachable de l'ensemble qui l'a produit ; là est la différence entre l'*engendré* et le *produit*. »<sup>1</sup> Lorsque l'on parle des premiers moteurs électriques et de machines à vapeur, cet organe serait le piston.

### *b) Fonctionnement d'une machine à vapeur*

Une machine à vapeur transforme l'énergie thermique de la vapeur d'eau en énergie mécanique. La vapeur pousse un piston qui met en mouvement une manivelle. Dans les premiers moteurs électriques, quand un courant circulait dans le fil qui entourait la bobine, l'armature rentrait dans la bobine.

Dans certains moteurs, le mouvement rectiligne de l'armature était transformé en mouvement circulaire avec le même mécanisme que celui des machines à vapeur qui transformait le mouvement vertical du piston en mouvement circulaire<sup>2</sup>.

### *c) Moteur électrique de Page*

Le premier moteur dont la construction était analogue à celle d'une machine à vapeur était celui de l'Américain Page :

« Qu'on se figure deux bobines recouvertes de gros fil et reliées entre elles de manière à constituer un seul et même cylindre, dans lequel puisse circuler librement un cylindre de fer ; on comprendra que le courant se trouvant distribué à propos et alternativement dans l'une et l'autre de ces bobines, le cylindre mobile de fer se trouvera tour à tour attiré, (...) et entrera dans un mouvement oscillatoire que l'on pourra rendre assez étendu par l'allongement ou la succession des bobines. Ce

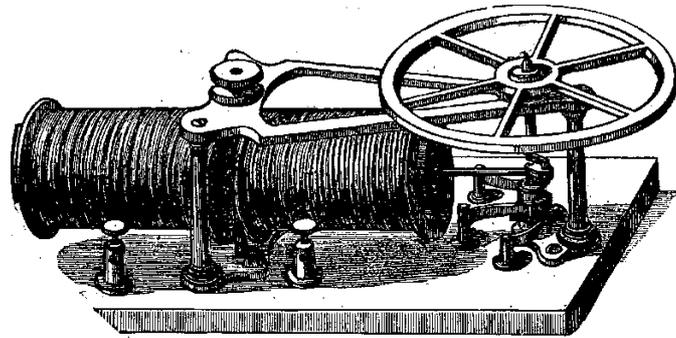
---

<sup>1</sup> Ibid., p82-83.

<sup>2</sup> Louis Figuier (1884), *Les nouvelles conquêtes de la science. L'électricité* / par Louis Figuier, Paris : Librairie illustrée, p502.

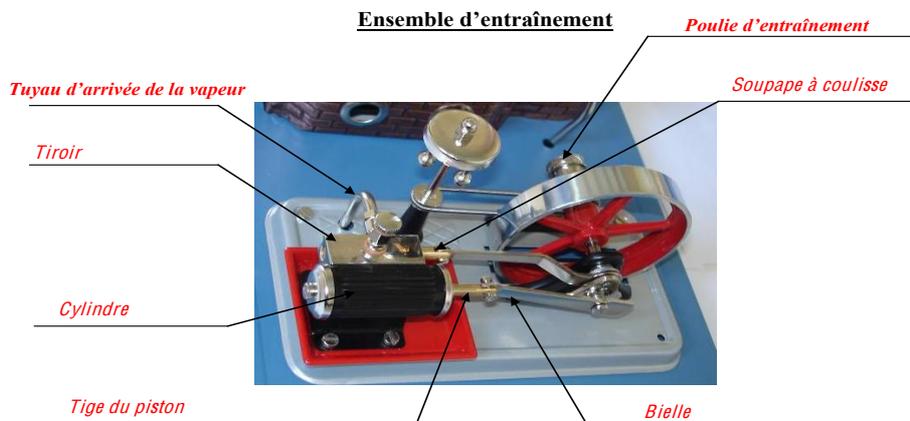
cylindre formera donc comme le piston d'une machine à vapeur, dont il suffira d'articuler la tige à une manivelle, pour transformer son mouvement de va et vient en mouvement circulaire continu. »<sup>1</sup>

Schémas du moteur électrique de Page en haut, d'une machine à vapeur de Watt en bas :



Moteur Page

Source : Théodose du Moncel (1878), *Exposé des Applications de l'Electricité. Tome 5, 3<sup>ème</sup> édition*, Paris : Librairie scientifique industrielle et agricole Eugène Lacroix, p373.



Dessin tiré d'un document intitulé « Le fonctionnement d'une machine à vapeur » produit par l'Académie François Bourbon, <http://www.afbourdon.com>

#### d) Moteur électrique de Jean-Gustave Bourbouze

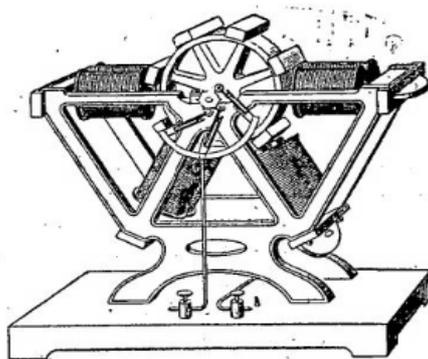
Le moteur de Jean-Gustave Bourbouze (1825 – 1889)<sup>1</sup>, inventeur et constructeur d'instruments, était construit « en faisant entrer dans deux longues bobines enroulées de fil

<sup>1</sup> Théodose du Moncel (1878), *Exposé des Applications de l'Electricité. Tome 5, 3<sup>ème</sup> édition*, Paris : Librairie scientifique industrielle et agricole Eugène Lacroix, p373. De son propre aveu, Théodose du Moncel copia la construction du moteur de Page en 1851, qui remporta un certain succès en France.

métallique deux doubles fers d'électro-aimants dont l'un étant mobile *sert de piston et agit sur un balancier pour la transformation du mouvement* »<sup>2</sup>. Il était selon Gilbert Simondon une copie de la machine à vapeur de Watt. Il était aussi selon lui moins « concret » que celui de Gustave Froment présenté ci-dessous.

#### *e) Concrétisation du moteur électrique de Gustave Froment*

L'un des premiers constructeurs de moteurs électriques en France fut Gustave Froment (1815 – 1865), constructeur d'instruments scientifiques. Il inventa son premier moteur en 1844. Il servait à l'alimentation de petites pompes à eau ou bien comme appareil de démonstration dans les cours de physique. Dans sa construction, ce moteur ressemblait non pas à une machine à vapeur mais à une roue à aube. En voici une représentation :



Moteur de Gustave Froment à rotation directe.

Source : Théodose du Moncel (1878), *Exposé des Applications de l'Electricité. Tome 5, 3<sup>ème</sup> édition*, Paris : Librairie scientifique industrielle et agricole Eugène Lacroix, p387.

C'est ce modèle de moteur que l'on retrouve en photo dans l'ouvrage de Gilbert Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, planche 14. Il le qualifia de moteur plus « concret » que le moteur de Jean-Gustave Bourbouze. Gilbert Simondon définissait la concrétisation comme une sorte d'évolution des objets techniques :

« L'évolution spécifique des objets techniques ne se fait pas de manière absolument continue, ni non plus de manière complètement discontinue ; elle comporte des paliers qui sont définis par le fait qu'ils réalisent des systèmes successifs de cohérence ; entre les paliers qui marquent une réorganisation

---

<sup>1</sup> Jean-Gustave Bourbouze également préparateur du cours du professeur de physique à la Sorbonne Paul Desains.

<sup>2</sup> Ibid., p405.

structurale, une évolution de type continu peut exister ; elle est due à des perfectionnements de détail résultant de l'expérience de l'usage, et à la production de matières premières ou de dispositifs annexes mieux adaptés. »<sup>1</sup>

Rejoignant la philosophie biologique des techniques énoncée par Ernst Kapp, pour Gilbert Simondon, un « objet technique concret, c'est-à-dire évolué »<sup>2</sup> est un objet qui ressemble à un objet naturel, par opposition à un objet abstrait ou artificiel, devant être entretenu par l'homme qui l'a créé :

« (...) L'artificialité essentielle d'un objet réside dans le fait que l'homme doit intervenir pour maintenir cet objet dans l'existence en le protégeant contre le monde naturel, en lui donnant un statut à part d'existence.

(...)

Au contraire, par la concrétisation technique, l'objet, primitivement artificiel, devient de plus en plus semblable à l'objet naturel. »<sup>3</sup>

Un objet technique est artificiel ou abstrait lorsqu'« il est la traduction en matière d'un ensemble de notions et de principes scientifiques séparés les uns des autres en profondeur, et rattachés seulement par leurs conséquences qui sont convergentes pour la production d'un effet recherché »<sup>4</sup>, ou encore lorsqu'« il vient après le savoir, et ne peut rien apprendre (...) »<sup>5</sup>.

L'évolution des moteurs électriques ne s'est pas faite de manière continue puisque peu de temps après avoir conçu son moteur électrique sur des principes mécaniques analogues à ceux d'une roue à aube, Gustave Froment inventa un autre moteur, qualifié de moteur « à simple effet », une nouvelle fois inspiré par une machine à vapeur. Dans ce moteur, une armature en fer était attirée et repoussée par un électro-aimant. Le mouvement de l'armature de haut en bas agissait sur une manivelle de volant. Un interrupteur se chargeait de couper le courant quand l'armature était en bas, qui était relevée par le mouvement du volant,

---

<sup>1</sup> Gilbert Simondon (2012), *Du mode d'existence des objets techniques*, Editions Aubier, p31.

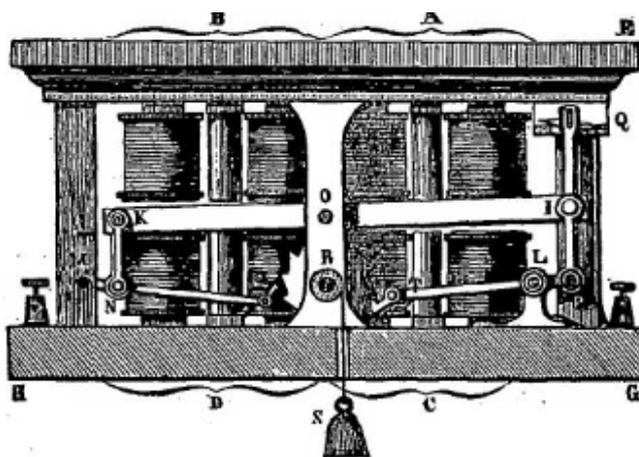
<sup>2</sup> Ibid., p56.

<sup>3</sup> Ibid., p56-57.

<sup>4</sup> Ibid., p56.

<sup>5</sup> Ibid., p56.

comme dans les machines à vapeur<sup>1</sup>. Dans son moteur à double effet, l'effet était double car il y avait deux électro-aimants qui agissaient sur l'armature, un au-dessus et un en-dessous. Ce moteur ressemblait encore plus à une machine à vapeur car il avait deux manivelles dont le mouvement était opposé. Le moteur avait aussi un interrupteur qui activait les électro-aimants chacun leur tour. Ci-dessous un moteur à quatre effet, car disposant de quatre électro-aimants :



Moteur de Gustave Froment à quadruple effet

Source : Théodose du Moncel (1878), *Exposé des Applications de l'Electricité. Tome 5, 3<sup>ème</sup> édition*, Paris : Librairie scientifique industrielle et agricole Eugène Lacroix, p377.

Comparant le moteur de Gustave Froment à celui de Jean-Gustave Bourbouze, tous deux abstraits bien qu'à des degrés différents, Gilbert Simondon nota qu'en matière de moteur électrique, « la véritable invention est celle de Gramme »<sup>2</sup>, que nous évoquerons plus loin.

<sup>1</sup> Théodose du Moncel (1878), *Exposé des Applications de l'Electricité. Tome 5, 3<sup>ème</sup> édition*, Paris : Librairie scientifique industrielle et agricole Eugène Lacroix, p378.

<sup>2</sup> Gilbert Simondon, *Ibid.*, planche 14.

#### 4. Première évaluation théorique d'un moteur électrique par Moritz Jacobi en 1840. Influence de la théorie mécanique dans les calculs de rendement.

Moritz Hermann Jacobi (1801 – 1874) était un ingénieur et physicien allemand dont les travaux furent d'une grande importance dans le développement des applications pratiques de l'électricité. En 1837, il découvrit la galvanoplastie, dépôt de métal à la surface d'objets par électrolyse<sup>1</sup>. Une des premières expériences reconnues avec des moteurs électriques fut celle qu'il réalisa en 1838 à Saint-Petersbourg, où il réussit à faire avancer un petit bateau avec 12 personnes à bord à partir d'un moteur électrique de sa conception, alimenté en courant continu par une pile. Il est reconnu dans l'histoire des sciences comme l'un des premiers à avoir trouvé une formule pour mesurer le rendement des moteurs électriques. Il commença ses travaux au moment où la science commençait tout juste à formaliser les phénomènes électromécaniques, ce qui lui fit écrire en 1852 : « Au commencement de mes travaux, il y a environ seize ans, où on ne savait rien encore des lois des électro-aimants, les machines électromagnétiques n'avaient pu être construites que par tâtonnement. »<sup>2</sup> C'est pourquoi il eut recours aux outils conceptuels tirés non pas de la science électrique, encore trop jeune comme discipline, mais de la mécanique. Le sens économique de ces outils fut étudié dans le détail par François Vatin.

Dans un mémoire paru en 1840 et considéré comme la première étude des machines électriques utilisées comme moteurs, Jacobi chercha à déterminer les conditions permettant d'obtenir le maximum d'effet utile d'un moteur électrique pour un minimum de dépenses. Dans ce mémoire, afin de déterminer le rendement de son moteur électrique, Jacobi s'inspirait d'un concept élaboré par des ingénieurs mécaniciens britanniques pour évaluer le travail fourni par des machines à vapeur, le « duty », et qui se définissait comme le rapport entre travail utile fourni par une machine à vapeur et dépense en charbon. Jacobi faisait donc explicitement appel aux principes généraux de la mécanique, qu'il appliqua au moteur

---

<sup>1</sup> Alfred Picard, *Rapport général de l'Exposition Universelle Internationale de 1889, Tome 7ème. L'outillage et les procédés des industries mécaniques. L'électricité*, Paris : Imprimerie Nationale, p311.

<sup>2</sup> Moritz Hermann Jacobi, « Mémoire sur la théorie des machines électromagnétiques », *Annales de chimie et de physique*, 3ème série, n°34, 1852, p451-484, p475.

électrique<sup>1</sup>. Rappelons que l'objectif des premiers ingénieurs électriciens était de construire des moteurs dont les performances devaient au moins égaler celles des machines à vapeur, leurs concurrentes. Ils utilisaient ainsi les mêmes outils de mesure pour les comparer.

Il fit également appel au concept de *travail* d'une force développée par une machine. Dans une lettre du 20 décembre 1836 où son frère Carl Gustav Jacob Jacobi s'adresse à lui, on voit que Moritz Jacobi baignait dans la culture mécanique et connaissait les fondateurs du concept de travail d'une force :

"Think of the immense span of your favorite field, applied mathematics, and of the beautiful state to which it has been brought by the work of Navier, Coriolis and in particular of my friend Poncelet; with strenuous intellectual labour you have made yourself at home in their work, as no one else in Germany has, you have further developed their higher principles and incorporated [them] into the length and breadth of technology, [this is] your real and true vocation."<sup>2</sup>

#### *a) Efficacité mécanique*

Au 19<sup>ème</sup> siècle, la quête d'efficacité s'exprima à travers la mécanique et les choix de valeur qui y sont associés, qui se répandirent dans une autre discipline alors naissante, l'économie. François Vatin développa l'idée selon laquelle le lien entre ces deux disciplines s'est fait dès la première moitié du 19<sup>ème</sup> siècle avec l'étude des machines utilisées dans l'industrie et la formalisation en physique du travail d'une force. Dans son ouvrage « *Le travail. Economie et physique* », il démontra que la grandeur physique « force par distance », qui définit le travail d'une force, est aussi une mesure pertinente du travail au sens ordinaire du terme.

François Vatin nous rappelle que le travail d'une force en physique se définit comme le produit d'une force par le déplacement de son point d'application. Cette définition fut donnée à partir de deux points de vue : le point de vue formel, issu de la mécanique rationnelle de Descartes, Newton ou Leibniz, et le point de vue pratique, issu de la théorie des machines, consistant à mesurer l'effet utile produit par une machine. La mécanique

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> H. Otto Sibum (2003), « Experimentalists in the Republic of Letters », *Science in Context*, 16, pp 89-120. doi:10.1017/S0269889703000747.

rationnelle se développa du 17<sup>ème</sup> au 19<sup>ème</sup> siècle de Galilée à Lagrange. Parallèlement se développa la science des machines, dont le projet était la conception et l'usage des machines<sup>1</sup>. Initialement, mécanique rationnelle et science des machines étaient deux disciplines distinctes à cause de l'imperfection des machines, nids de frottements. A la fin du 18<sup>ème</sup> siècle, au moment où la thermodynamique se développa grâce à l'étude des machines à vapeur, la science des machines devint formellement intégrée dans la mécanique rationnelle. Le concept physique de travail d'une force apparut à ce moment-là, entre 1780 et 1830. Les savants étaient alors à la recherche d'une norme de valeur pour penser l'économie des machines<sup>2</sup>. Cette formalisation est contemporaine de la première révolution industrielle et de la naissance de l'économie politique classique<sup>3</sup>. Les ingénieurs mécaniciens du 19<sup>ème</sup> siècle se mirent à la recherche d'une théorie physico-économique de la machine.

L'une des études pionnières dans le domaine de la mesure du travail fut celle de Guillaume Amontons en 1699, dans laquelle il chercha à démontrer qu'un moteur thermique de son invention pouvait avoir un usage économique. Il procéda par comparaison et compara l'effet utile produit par son moteur à l'effet utile produit par des hommes. Guillaume Amontons définissait le travail comme un effort développé pour vaincre une résistance. Il mesura une force dynamique par le produit d'une force statique par une vitesse et un temps. On retrouva la même idée chez Charles-Augustin Coulomb (1736 – 1806), qui rédigea un mémoire sur la théorie des frottements pour l'Académie des Sciences en 1781, dans lequel il étudiait le travail d'un homme sur une journée et dont la tâche consistait à élever à une certaine hauteur  $h$  une charge ayant une masse  $P$ , pour une fatigue donnée. Le produit de la masse  $P$  élevée à une hauteur  $h$  donnait la mesure de l'effet utile. Pour trouver l'effet utile maximum, il eut recours à la grandeur « quantité d'actions » qu'il définissait comme la masse du corps de l'homme plus la masse de la charge transportée par la hauteur à laquelle était élevée la charge<sup>4</sup>. Leur produit représentait l'effet utile à optimiser. Comme Bernard Grall le démontra, ce modèle d'optimisation de Coulomb a eu de l'importance dans les travaux de certains ingénieurs du 19<sup>ème</sup> siècle, que ce soit ceux qui cherchaient à évaluer les routes afin

---

<sup>1</sup> François Vatin (1993), *Le travail. Economie et physique*, Paris : Presses Universitaires de France, p22.

<sup>2</sup> Ibid., p8.

<sup>3</sup> Ibid., p9.

<sup>4</sup> Ibid, p46.

de minimiser le budget de leur entretien, ou ceux qui des chemins de fer qui cherchaient à y appliquer le meilleur tarif<sup>1</sup>. L'effet utile de Coulomb correspondait à ce que Coriolis (1792 – 1843) appela plus tard le *travail* au sens physique du terme : tout effet utile produit par une machine était équivalent à l'élévation d'une masse à une certaine hauteur. Pour Coriolis, « le « travail » est bien la juste mesure de l'action des machines et le « rendement » en « travail utile » celle de leur efficacité »<sup>2</sup>. Pour Claude-Louis Navier (1785 – 1836), le produit  $P * h$  devenait une sorte de « monnaie mécanique » permettant de comparer les machines entre elles en fonction de l'effet utile qu'elles pouvaient donner.

#### *b) Résultats de Jacobi sur le rendement électrique d'un moteur. Différence entre travail et puissance*

Le travail d'une machine, qu'elle soit électrique ou pas, se définit comme l'effet que cette machine produit. Tout au long de son texte, Jacobi est cohérent avec la théorie physique du travail sur ce point puisqu'il parle de « travail » et d'« effet » de manière synonyme. Appliqué à son moteur électrique, Jacobi définissait un tel travail comme étant égal au produit de la *force* qu'il fournit par sa *vitesse*. Cependant, le travail développé par une machine se définissait déjà par les physiciens comme le produit entre la force fournie par la machine et la *distance* parcourue par son point d'application, et non sa vitesse. Avec une telle définition du travail, Jacobi détermina en réalité la puissance électrique fournie par le moteur électrique, c'est-à-dire un travail accompli par unité de temps et non simplement un travail.

Les dépenses nécessaires pour produire cette puissance correspondaient selon lui à la quantité de zinc dissoute dans la pile qui alimentait le moteur en courant. Il faisait une analogie entre le zinc dissout dans la pile et le charbon brûlé par combustion dans une machine à vapeur. Jacobi trouva que, quand son moteur était poussé à son maximum de puissance, celle-ci était égale à la moitié de la puissance fournie au moteur. Il en déduisit que l'effet économique, ou rendement, de son moteur électrique était au mieux égal à 50%, ce qui était jugé insuffisant. Plus encore, le prix élevé du zinc, nécessaire en grande quantité pour

---

<sup>1</sup> Bernard Grall (2004), *Économie de forces et productions d'utilités – L'émergence du calcul économique chez les ingénieurs des Ponts et Chaussées (1831 – 1891)*, Rennes : Presses Universitaires de Rennes, p68.

<sup>2</sup> François Vatin, *ibid.*, p70.

produire cet effet, découragea quelque peu Jacobi puisqu'il ne publia aucun travail à ce sujet jusqu'en 1852, date à laquelle il réexposa les mêmes résultats en 1840 dans un autre mémoire.

Ainsi, la théorie du moteur électrique s'est constituée avec des références issues du domaine de la mécanique industrielle. La réappropriation de certains concepts physiques dans le nouveau domaine de l'électricité nécessitait toutefois quelques ajustements. En effet, bien que pouvant être prise comme une étude sur le rendement d'un moteur électrique, le mémoire de Jacobi fournit finalement la loi de puissance maximale d'un moteur électrique. Il est important de faire la distinction entre rendement maximal et puissance maximale puisque comme l'explique Silvanus Thompson dans son ouvrage de 1886 : « Une machine ne fonctionne généralement pas dans les meilleures conditions d'économie quand elle effectue le plus de travail dans le moindre temps possible ; il en est de même d'un moteur électrique : ses meilleures conditions d'économie et de rendement ne correspondent pas nécessairement au développement de sa puissance maximum. »<sup>1</sup> Puissance maximale et rendement maximal sont donc deux choses distinctes. Jacobi pouvait obtenir un meilleur rendement si son moteur ne tournait pas au maximum de ses capacités, c'est-à-dire obtenir un effet utile moindre avec un meilleur « effet économique » au final. En 1851, Lord Kelvin puis James Prescott Joule formulèrent la véritable loi de rendement électrique d'un moteur. Ils définirent ce rendement comme le rapport entre la tension du courant aux bornes du moteur et la tension du courant fourni par la source de courant qui l'alimente.<sup>2</sup>

### *c) Une alternative au coût du zinc proposée par Jacobi. Contrainte de la matière*

Malgré les difficultés rencontrées, Jacobi avait des solutions pour contourner ce problème de l'effet utile produit par le moteur électrique. À défaut de pouvoir augmenter cet effet, il fallait diminuer les dépenses nécessaires pour le produire. À cette époque, l'énergie électrique était produite par des piles au zinc qui se décomposait chimiquement sous forme de sulfate de zinc. Jacobi proposait de réutiliser dans l'industrie le résidu de la pile, pour la production de peinture par exemple. Il proposait également de faire double usage des piles,

---

<sup>1</sup> Silvanus P. Thompson (1886), *Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques*, Paris : Baudry, p871.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p869-889.

qui pouvaient à la fois alimenter des moteurs et permettre d'autres utilisations industrielles de l'électricité, comme la galvanoplastie. De cette manière, le monde social pouvait compenser la contrainte que lui imposait la matière. La méthode d'analyse de Pierre Lemonnier évoquée précédemment permet en effet de donner un certain sens au projet de Jacobi qui visait à contourner la contrainte matérielle empêchant le moteur électrique d'avoir un bon rendement en le joignant à d'autres non-humains, la pile au zinc, les mûrs à peindre, les objets de décoration à recouvrir de métal, tous formant un collectif.

La vocation industrielle des tout premiers moteurs électriques imposait de connaître leur rendement. L'expérience et le calcul amenèrent Jacobi à penser que leur rendement ne pouvait pas dépasser 50%. En l'état des connaissances à son époque, il ne croyait pas possible de modifier la construction du moteur et d'augmenter son efficacité. Dans ce cas, il semble alors que l'argument de Pierre Lemonnier présenté précédemment l'emporte : la matière imposa une telle contrainte sur le savant qu'il en abandonna ses recherches pendant plus de dix ans ; le moteur électrique ne deviendrait jamais un objet industriel. Ainsi sur cette courte période, la contrainte de la matière était indépassable, aucun progrès sur la maîtrise des moteurs électriques ne fut possible. Pourtant dans un temps long, par exemple les 170 ans qui nous séparent des premiers travaux de Jacobi, le pouvoir de l'homme s'est accru au point de pouvoir construire des moteurs électriques au rendement de 95% et capable de déplacer des trains à plus de 300 km/heure.

### *III. Deuxième catégorie de moteurs. Aux origines de la production du courant. Transition des piles aux premières machines génératrices de courant, réversibles.*

#### **1. Bilan sur la construction des premiers moteurs électriques avant 1873**

Avant 1873, le constat fut que la puissance générée par les moteurs électriques était très faible et les rendait non utilisables dans l'industrie. Ils pouvaient peser jusqu'à 500 kg pour ne fournir qu'une force équivalente à celle d'un homme (Louis Figuier, 1868). Selon Noël Felici, cela tenait à leur mauvaise construction : parce que les inventeurs avaient en tête la construction des machines à vapeur, les premiers moteurs électriques étaient construits de telle sorte qu'une grande part de l'énergie fournie par la pile était gaspillée.

La construction des premiers moteurs électriques posait aussi des problèmes d'origine magnétique <sup>1</sup>, le mouvement mécanique généré par l'attraction et la répulsion magnétique étant trop faible. Les aimantations et désaimantations des électro-aimants n'allaient pas assez vite ; parfois un électro-aimant restait aimanté alors que ça n'était plus nécessaire, le moteur ne pouvait donc pas aller assez vite : c'est le problème de l'hystérésis. De plus, l'entrefer, c'est-à-dire la distance entre les aimants et l'armature, n'était pas optimal. Elle était souvent trop grande, même si l'écart permettait au moins de ne pas faire plier les inducteurs ou l'armature de la machine.

Il y avait également des problèmes d'ordre mécanique : plutôt que de déplacer un élément et de le ramener à sa place d'origine, il aurait été plus efficace d'avoir un mouvement de rotation continu, comme dans le premier moteur de Gustave Froment inspiré d'une roue à aube<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Louis Figuier (1884), *Les nouvelles conquêtes de la science. L'électricité* / par Louis Figuier, Paris : Librairie illustrée, p508.

<sup>2</sup> Frank Géraldy, « Le moteur électrique de A. Bessolo. Le moteur électromagnétique à anneau ouvert de C. W. Siemens », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°49, 8 décembre 1883, p462 à 468, p463.

Et enfin, la source de courant était trop chère. Noël Felici de constater : « La pile produit une énergie limitée et chère, le moteur en gaspille une bonne partie en arcs de rupture. »<sup>1</sup> Plus loin, il ajoute : « Malgré Lord Kelvin et son équation, aucun n'a raisonné : un kilogramme de zinc dégage bien moins de chaleur qu'un kilogramme de charbon. Il coûte beaucoup plus cher. Il vaut donc mieux s'en tenir à la vapeur ! »<sup>2</sup>

Théodore du Moncel, dans le tome 2 de son ouvrage *Exposé des Applications de l'Électricité* (1873), explique lui aussi : « Les effets si considérables qu'on avait obtenus avec les machines magnéto-électriques ne tardèrent pas à faire naître l'idée de les employer comme générateurs économiques d'électricité ; on pensa qu'en les construisant avec de grandes dimensions et en leur appliquant un moteur à vapeur, on pourrait non seulement réduire considérablement la dépense de la production de l'électricité si coûteuse avec les piles, mais encore qu'on pourrait obtenir par leur intermédiaire des courants beaucoup plus constants et plus réguliers dans leur action. »<sup>3</sup>

Edmond Becquerel, dans le rapport du jury de l'Exposition de 1867<sup>4</sup>, évoqua lui aussi les moteurs électriques de la première période. Il mentionna les travaux pionniers de Jacobi, et les différents types de moteurs construits à la suite du sien, sur le modèle des machines à vapeur. L'inconvénient de ces premiers moteurs, en plus de leur puissance utile trop faible et qui ne dépassait pas un cheval, était que même lorsqu'elle dépassait cette valeur, cela coûtait trop cher de la produire. Edmond Becquerel évalua que la production d'une puissance d'un cheval pendant une heure coûtait entre 1,50 franc et 3 francs en zinc, et qu'« il faudrait plus que doubler ces prix pour avoir la consommation totale de la pile »<sup>5</sup>. Par contre, pour Edouard Becquerel, on pouvait bien utiliser des machines génératrices de courant à la place des piles, mais cela revenait à ajouter un intermédiaire mécanique coûteux entre les deux. Il n'était donc pas, en 1867, très optimiste quant à l'usage de moteurs électriques dans l'industrie<sup>6</sup>.

---

<sup>1</sup> Noël J. Felici, *ibid.*, p61.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p58.

<sup>3</sup> Théodore du Moncel (1873), *Exposé des Applications de l'Électricité*, Tome 2, Paris : Librairie scientifique, industrielle et agricole Eugène Lacroix, p193.

<sup>4</sup> Edmond Becquerel, « Applications de l'électricité considérée au point de vue dynamique », Section III, Classe 64 : « Matériel et procédés de la télégraphie », Groupe 6 : « Instruments et procédés des arts usuels », *Rapport du jury international de l'Exposition Universelle de 1867*, p37 à 42.

<sup>5</sup> *Ibid.*, p41.

<sup>6</sup> *Ibid.*

Ce point de vue était partagé par l'ensemble de la communauté des électriciens au sortir de l'Exposition universelle de 1867, qui recommandait, en ce qui concerne la production de petites forces, de recourir aux moteurs à gaz ou aux moteurs à air chaud : « (...) Tant qu'on n'aura pas trouvé une autre combinaison électro-magnétique que l'oxydation du zinc, il n'y aura aucune comparaison à établir entre le prix de revient de la force ainsi produite avec celle engendrée par la combustion de la houille »<sup>1</sup>.

Ce fut le cas jusqu'à l'invention des machines génératrices de courant qui vinrent remplacer les piles, et mises en mouvement pour la plupart par des machines à vapeur.

## 2. Le commutateur pour mimer le courant fourni par les piles

### *a) Coût élevé des piles*

Les moteurs électriques ont existé avant les machines génératrices de courant<sup>2</sup> et malgré cela, il fallut attendre la construction de ces dernières pour que l'usage industriel des moteurs devienne envisageable. Une des raisons à cela était qu'avant les génératrices, le moyen d'alimenter le moteur électrique en courant était trop coûteux. Il s'agissait de la pile électrique, ou pile galvanique ou pile voltaïque à cette époque, du nom de leurs inventeurs Luigi Galvani (1737 – 1798) et Alessandro Volta (1745 – 1827), utilisant des phénomènes chimiques produits lors de la mise en contact de certains corps.

### *b) Attentes liées à la découverte de la pile électrique*

L'invention de la pile Volta fut le point de départ de nombreuses recherches sur l'électricité et ses applications, dans la science et dans l'industrie.

Pour soutenir cette recherche, l'empereur Napoléon Bonaparte (1769 – 1821) instaura en 1802 le prix du galvanisme, d'un montant de 3000 francs, remis par l'Académie des Sciences. Le galvanisme était l'application des courants électriques au domaine médical. Les conditions

---

<sup>1</sup> « Petits moteurs industriels », *Revue Industrielle*, 1871, p195.

<sup>2</sup> Thomas Commerford Martin, « History and Progress of Electricity as Applied to Motors », *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1886, p42 à 64, p43.

du concours étaient proches de celles autour du prix Copley décerné par la *Société Royale de Londres*.

En 1852, Napoléon III (1808 – 1873), neveu de Napoléon I<sup>er</sup> et alors président de la République, instaura le prix Volta, récompensant de 50 000 francs l'inventeur de « l'application la plus utile de la pile Volta »<sup>1</sup>. La commission chargée de superviser le concours était constituée de Coulomb, Laplace, Hallé et Biot. Le décret, passé le 23 février 1852, soulignait les avancées permises par la découverte de la pile Volta :

« Considérant qu'au commencement du siècle, la pile Volta a été jugée le plus admirable des instruments scientifiques ; qu'elle a donné à la chaleur les températures les plus élevées, à la lumière une intensité qui dépasse toutes les lumières artificielles ; aux arts chimiques, une force mise à profit par la galvanoplastie et le travail des métaux précieux ; et à la physiologie et à la médecine pratique, des moyens dont l'efficacité est sur le point d'être constatée ; qu'elle a créé la télégraphie électrique ; qu'elle est ainsi devenue et tend encore à devenir, comme l'avait prévu l'Empereur, le plus puissant des agents industriels ; considérant dès lors, qu'il est d'un haut intérêt d'appeler les savants de toutes les nations à concourir au développement des applications les plus utiles de la pile Volta, etc. »<sup>2</sup>

### *c) Remplacement des piles par les machines. Limite des machines à induction*

Malgré les attentes les concernant, l'inconvénient des piles électriques était qu'elles ne fournissaient pas assez d'énergie électrique pour permettre un usage industriel des moteurs. Il fallait donc trouver une autre source, plus puissante et si possible produisant un courant de même nature c'est-à-dire continu, aussi appelé voltaïque ou galvanique. Le courant dit « continu » est un courant électrique indépendant du temps et qui ne circule que dans une seule direction. Le courant dit « alternatif » est un courant électrique dont le sens de circulation change au cours du temps.

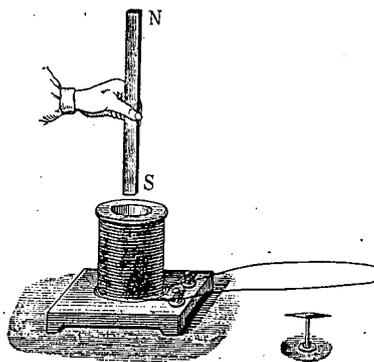
La nature du courant dépend du fonctionnement des machines électriques, qui repose sur le phénomène d'*induction*. En 1831 en Angleterre, Michael Faraday (1791 – 1867) trouva le moyen de générer de l'électricité à partir d'un fil conducteur et d'un aimant. Il eut l'idée

---

<sup>1</sup> Thèse de 2008 de Stéphanie Deproux, « Un héritage des Bonaparte : Le prix du galvanisme (1802-1815) et le prix Volta (1852-1888). L'État et l'encouragement à la recherche sur l'électricité », Ecole des Chartes.

<sup>2</sup> Armangaud, « Biographie de M. Ruhmkorff, fabricant d'instruments de précision, à Paris », *Le Génie industriel*, Juillet 1866, p24.

d'enrouler ce fil autour d'une bobine en bois, creuse à l'intérieur, dans laquelle il déplaça un aimant, ce qui produisit, le temps du déplacement de l'aimant, un courant électrique dans le fil. Il démontra ainsi qu'un aimant pouvait générer ou *induire* de l'électricité dans un fil de fer quand l'un ou l'autre était en mouvement.



Le barreau aimanté était qualifié d'*aimant inducteur* ; le courant engendré dans le fil *courant induit*. Les premières machines génératrices de courant basées sur ce principe étaient qualifiées de *machines magnéto-électriques*. Dans ces machines, le mouvement de va-et-vient de l'induit devant le système inducteur impliquait que le courant change alternativement de sens. Or la référence en termes de courant électrique était celui produit par la pile, le courant continu. Maurice Leblanc et Maurice Hutin écrivent en 1891 :

« L'esprit humain conçoit mieux l'action d'un fluide animé d'une vitesse de direction constante que celle que peut exercer ce même fluide lorsqu'il est simplement le lieu d'un mouvement ondulatoire. C'est ainsi qu'en optique la théorie de l'émission a précédé la théorie des ondulations. C'est ainsi également que, dans l'ordre des applications électriques, on s'est rendu compte dès le début de la possibilité d'utiliser les courants continus, et presque tous les efforts des inventeurs se sont portés jusqu'ici sur les moyens de les obtenir. Cependant les machines d'induction, qui sont pour nous, à l'heure actuelle, la seule source d'électricité, fournissent naturellement des courants alternatifs, et il a fallu violenter la nature, en quelque sorte, comme a réussi à le faire M. Gramme, pour transformer ces courants en courants continus. »<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Maurice Leblanc, Maurice Hutin, « Etude sur les courants alternatifs et leur application au transport de la force », *La Lumière Electrique*, n°18, 2 mai 1891, p202.

La préexistence de la pile voltaïque peut permettre de comprendre pourquoi ce courant alternatif obtenu primitivement et plus simplement que le courant continu avec une machine électrique n'était pas tout à fait satisfaisant, et pourquoi on inventa le commutateur pour produire des courants continus. D'ailleurs Alessandro Volta créa la pile au milieu de sa controverse avec Luigi Galvani, dans le but de lui démontrer que la nature de l'électricité animale n'était pas distincte de l'électricité produite à partir de métaux. L'invention de la pile mit fin au débat. Il était donc peut-être encore un peu trop tôt, trente ans plus tard, pour en rouvrir un autre sur la nature des courants alternatifs.

#### *d) Le premier commutateur. Premières machines à aimants permanents.*

##### *1. Machine de Pixii, première machine magnéto-électrique*

Puisqu'il fallait construire des machines productrices de courants continus, en plus de l'inducteur et de l'induit, les premières machines génératrices de courant se composaient d'un troisième élément : le commutateur, « organe admirable » qui permettait de faire changer de sens un courant plusieurs fois par seconde, et qui a permis de résoudre l'un des problèmes les « plus compliqués de l'électrotechnique »<sup>1</sup>. Il a permis de contrôler les courants alternatifs, naturellement produits par les premières dynamos et peu maîtrisés, en les transformant en courants continus. En voici une définition :

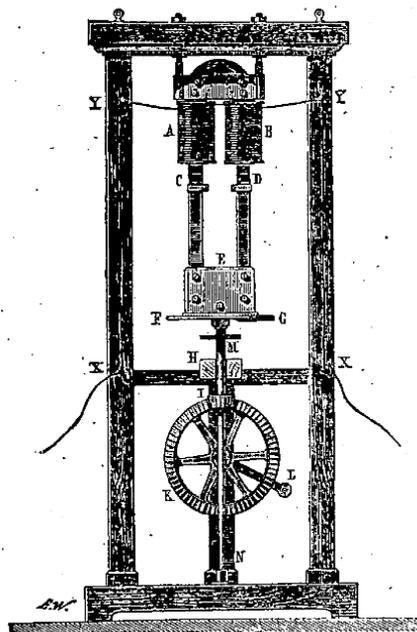
« Commutateur. – Appareil permettant de changer brusquement le sens du courant qui traverse un circuit, sans enlever les communications, ou de faire passer à volonté le courant d'un circuit dans un autre. Ces appareils, imaginés par Ampère, sont fréquemment employés dans les expériences d'électrodynamique, dans les télégraphes, etc. »<sup>2</sup>

Hippolyte Pixii (1808 – 1835), un constructeur d'instruments scientifiques d'origine italienne vivant à Paris, réalisa la construction de la première machine magnéto-électrique en 1832 sous la direction d'Ampère, qui l'utilisa dans son cours à la Sorbonne. Elle était constituée d'un aimant permanent et d'un gros électro-aimant en forme de fer à cheval.

---

<sup>1</sup> Paul Janet, « Progrès réalisés dans la grande industrie électrique pendant le dernier siècle », *Le Génie Civil*, numéro spécial : « L'évolution et le développement des principales industries depuis cinquante ans (1880 – 1930) », 1930, p109.

<sup>2</sup> Julien Lefèvre et Edmond Bouty (1891), *Dictionnaire d'électricité comprenant les applications aux sciences, aux arts et à l'industrie à l'usage des électriciens, des ingénieurs, des industriels, etc.*, Paris : Librairie J.-B. Baillière et Fils, p143.



Source : Théodore du Moncel (1872-1878), *Exposé des applications de l'électricité*, Tome 2, Paris: E. Lacroix, p188. Url : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k206318b/f187.image>

Dans sa forme initiale, la machine de Pixii produisait des courants alternatifs. Peu de temps après, Pixii inventa le commutateur qui permit à sa machine de produire du courant continu :

« (...) The invention of the first direct current dynamo, by H. Pixii, in 1832, had involved the addition of a commutator to the alternating current dynamo he had built immediately following Michael Faraday's formulation of the dynamo principle in the preceding year. »<sup>1</sup>

Louis Figuier nous explique le rôle du commutateur :

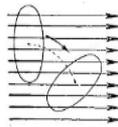
« Cette bobine de fils métalliques recouverts de soie, approchez-la et éloignez-la alternativement d'un aimant, et vous y verrez naître un courant d'induction d'une assez grande intensité ; de sorte qu'il suffira de faire tourner cette bobine autour d'un aimant, pour avoir une source continue d'électricité d'induction. Seulement, comme les deux courants qui parcourent les fils de cette bobine sont de sens opposé, c'est-à-dire l'un positif, l'autre négatif, on n'aurait qu'une série de courants successifs, de noms contraires, si l'on ne faisait usage d'aucun artifice. L'art intervient ici avec beaucoup de bonheur. On se sert d'un petit appareil, auquel on donne le nom de commutateur, à l'aide duquel tous les

---

<sup>1</sup> Paul A. David (1987), *The Hero and the Herd in the Technological History : Reflections on Thomas Edison and "the Battle of the Systems"*, Center for Economic Policy Research, Stanford University, p79-80.

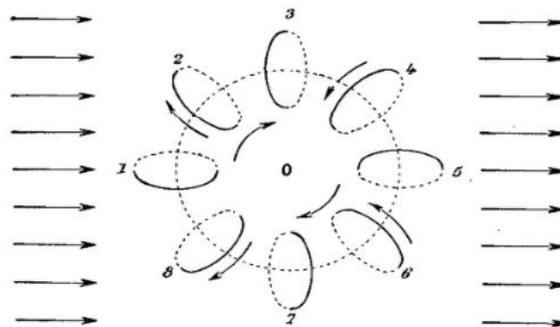
courants instantanés, alternativement positifs et négatifs, se trouvent dirigés dans le même sens. Dès lors, les deux extrémités de la bobine sont les pôles opposés d'une véritable source d'électricité d'induction ; et si on les recueille au moyen d'un commutateur, on a un courant électrique continu. »<sup>1</sup>

Ci-dessous, le déplacement d'une boucle de fil conducteur, ou spire, dans un champ magnétique uniforme dont les lignes de force sont représentées par les flèches horizontales :



Source : Henry Vivarez (1901), *Les phénomènes électriques et leurs applications : étude historique, technique et économique des transformations de l'énergie électrique*, Paris : G. Carré et C. Naud, p160 à 164.

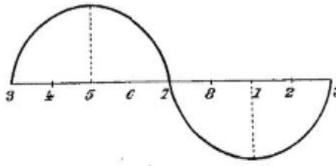
Ci-dessous, la même spire faisant le même mouvement de rotation autour de l'axe O, allant de la position 1 à la position 8, dans le même champ magnétique uniforme dont les lignes de force sont représentées par les flèches horizontales :



Source : Henry Vivarez (1901), *Les phénomènes électriques et leurs applications : étude historique, technique et économique des transformations de l'énergie électrique*, Paris : G. Carré et C. Naud, p160 à 164.

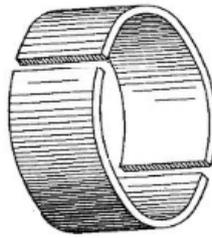
Ci-dessous, la tension du courant qui traverse la spire aux différentes positions représentées plus haut. La tension est positive dans le sens 3 → 4 → 5 → 6 → 7, et négatif dans le sens 7 → 8 → 1 → 2 → 3. Elle atteint un maximum en position 5 et en position 1 :

<sup>1</sup> Louis Figuiet, *ibid.*, p190-191.



Source : Henry Vivarez (1901), *Les phénomènes électriques et leurs applications : étude historique, technique et économique des transformations de l'énergie électrique*, Paris : G. Carré et C. Naud, p160 à 164.

Ci-dessous une bague fendue permettant de recueillir des courants continus. Les fentes se trouvent sur le plan au niveau duquel le courant s'inverse, appelé la « ligne neutre », et qui correspond au plan vertical [3 ; 7] dans le schéma ci-dessus :



Source : Henry Vivarez (1901), *Les phénomènes électriques et leurs applications : étude historique, technique et économique des transformations de l'énergie électrique*, Paris : G. Carré et C. Naud, p160 à 164.

Le commutateur était constitué d'une bague en cuivre comme représentée ci-dessus, reliée à l'arbre de la machine à courant continu. Des « galets » recueillaient le courant produit dans les spires en frottant sur le commutateur en rotation. A chaque passage au niveau de la ligne neutre, c'est-à-dire à chaque fente, les galets changeaient leur point de contact, ce qui permettait de recueillir à chaque fois des courants de même sens, c'est-à-dire un courant continu.

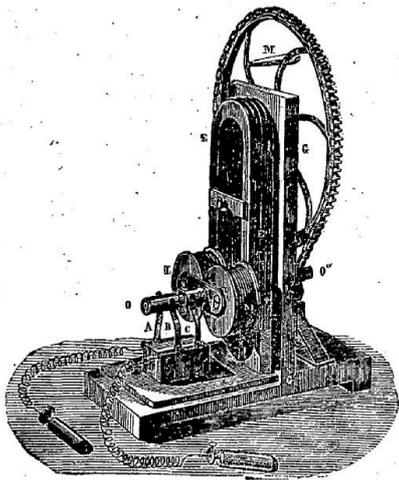
Lorsque le commutateur précédemment décrit était une bague non fendue, on parlait plutôt de collecteur ; le courant recueilli était alternatif.

## 2. Généalogie et usages limités des premières machines électriques de la compagnie l'Alliance

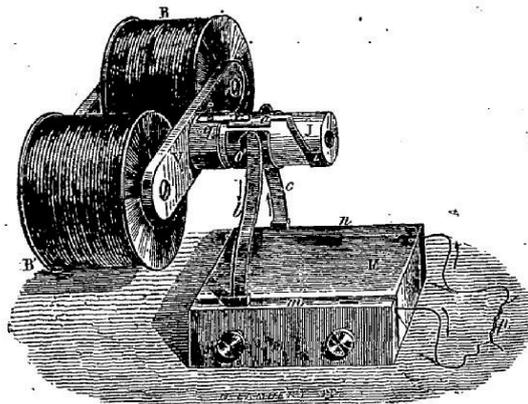
### 1. Généalogie

L'ingénieur nord-américain Saxton s'inspira de la machine de Pixii pour construire sa propre machine. Il diminua la taille de l'électro-aimant, le rendit mobile, augmenta la taille de l'aimant permanent, le plaça horizontalement et le rendit fixe. Ces modifications rendirent la machine de Saxton moins encombrante que celle de Pixii.

La machine de Clarke était la même que celle de Saxton excepté que l'aimant permanent était placé verticalement<sup>1</sup>. Elle pouvait soit produire du courant continu, soit du courant alternatif, selon qu'elle disposait d'un commutateur ou non.



Machine de Clarke,  
avec son aimant inducteur  
et ses deux bobines



Zoom sur les deux bobines  
et le commutateur de la machine de Clarke

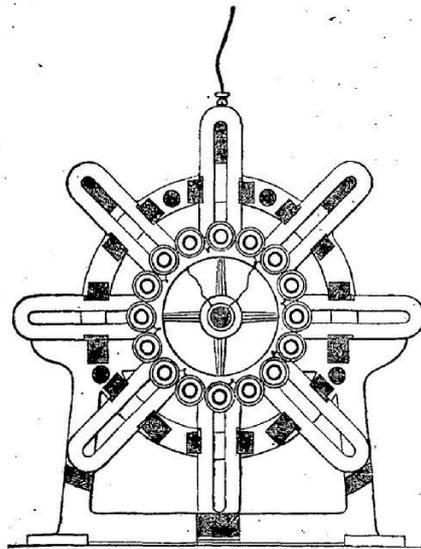
La construction d'une autre machine, la machine de l'entreprise française l'Alliance, reposait sur celle de la machine de Clarke. Elle fut imaginée en 1849 par Nollet, professeur de physique belge à l'École militaire de Bruxelles, et descendant du célèbre abbé Nollet<sup>2</sup>. Il était également le maître d'un ouvrier belge nommé Joseph Van Malderen. Lorsque Nollet mourut prématurément, Joseph Van Malderen donna les renseignements concernant la

<sup>1</sup> L'électro-aimant était constitué de deux bobines réunies par un morceau de fer.

<sup>2</sup> Louis Figuier, *ibid.*, p192.

construction de sa machine à un Anglais nommé Scheppard, qui contacta les futurs administrateurs de l'entreprise pour leur vendre la machine qui fut dorénavant nommée « machine de l'Alliance ». Il est intéressant de noter l'internationalisation de cet objet : la machine fut découverte en Belgique, fit un passage par l'Angleterre pour se retrouver en France. Joseph Van Malderen connaissait en effet des personnes au sein de la communauté des physiciens en Angleterre et en France, dont les observations furent précieuses pour perfectionner la machine<sup>1</sup>.

La machine de la *Compagnie l'Alliance* représentée ci-dessous était composée de 8 aimants permanents en forme de fer à cheval et de 16 bobines, le tout monté sur un disque. Chaque bobine se trouvait aimantée à son passage devant un aimant permanent ; elle était alors le siège de courants alternatifs, recueillis par un collecteur. La rotation se faisait grâce à une roue à manivelle.



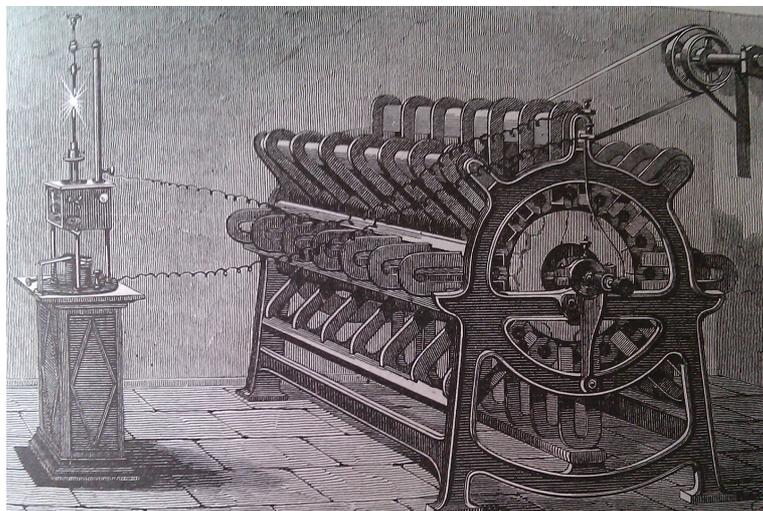
Machine de l'Alliance avec un disque constitué de 8 aimants permanents et de 16 bobines

Afin d'augmenter la puissance d'une machine, il était possible de la construire avec plusieurs disques tous montés sur le même arbre. Comme les éléments d'une pile électrique, on

---

<sup>1</sup> Th. Du Moncel, *ibid.*, Tome 2, p193.

pouvait faire varier le nombre de disques de la machines<sup>1</sup>. Il ne devait cependant pas y avoir trop de disques, sinon l'arbre pouvait plier sous leur poids.



Machine de l'Alliance avec plusieurs disques

## 2. Usages limités

### a) Gaz d'éclairage

Les machines l'Alliance furent les premières machines électriques à être utilisées dans l'industrie, ce dès 1850, dans le domaine de l'éclairage et dans l'industrie électrochimique, plus précisément la galvanoplastie. Avant cela, la vocation première de la machine avait été de fabriquer du gaz d'éclairage à partir de la décomposition de l'eau. L'électricité intervenait ici en tant qu'agent de décomposition de l'eau. Afin de rendre ce procédé industriel, des expériences furent réalisées, en présence de personnalités politiques et scientifiques. L'empereur Napoléon III autorisa la réalisation de recherches dans l'hôtel des Invalides. Néanmoins ce projet était, selon le scientifique Théodore du Moncel (1821 – 1884), insensé, et de son vivant Nollet n'avait jamais envisagé cela : « M. Nollet était complètement étranger à toutes ces manœuvres, et pour des personnes éclairées ces promesses elles-mêmes auraient dû suffire pour les tenir en garde. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> MM. Jamin et Roger cités par Th. du Moncel, *ibid.*, p199.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p193.

C'est sur la base de ce projet de décomposition de l'eau néanmoins que la société l'Alliance se constitua. Elle fut fondée pendant les premières années du Second Empire<sup>1</sup>. Joseph Van Malderen travailla pour l'entreprise pendant au moins dix ans. Ceux qui créèrent cette entreprise étaient qualifiés par Théodose du Moncel de « spéculateurs hardis, aidés de riches et puissants personnages »<sup>2</sup>.

Si le projet initial de décomposition de l'eau échoua, ce fut à cause de son coût<sup>3</sup>. Pour obtenir du gaz d'éclairage, il y avait beaucoup trop d'étapes : il fallait brûler du charbon, transformé en vapeur, utilisée par une machine à vapeur qui alimentait une machine magnéto-électrique qui produisait du courant qui décomposait de l'eau et produisait ainsi un gaz. Il était plus simple de passer directement de la combustion du charbon à la production de gaz.

#### *b) Eclairage des phares & galvanoplastie en courant alternatif*

Le dispositif de décomposition de l'eau étant trop cher, le projet fut abandonné et on utilisa les machines de la compagnie l'Alliance directement pour la production d'électricité d'éclairage :

« Dès lors les études de la Société suivirent une voie plus logique et un certain nombre de résultats pratiques fut bientôt obtenu. On sait que la machine de l'Alliance est la première qui ait fourni des courants alternatifs, elle est aussi la première qui ait pu fonctionner d'une façon assez continue pour être employée industriellement ; son usage dans les phares de la Hève remonte à 1863. »<sup>4</sup>

En effet, en 1863, la machine de l'Alliance fut utilisée dans les deux phares de la Hève, en Seine et Marne, qui devinrent ainsi les premiers phares électrifiés de France. Les machines étaient également utilisées pour l'éclairage des maisons ou des petites usines. Pour cet usage, leur dimension était réduite.

Quand la machine de l'Alliance était destinée à décomposer l'eau, l'effet qu'elle devait produire n'était que calorifique et il n'était pas influencé par le type de courant, alternatif ou

---

<sup>1</sup> Le Second Empire s'étendait de 1852 à 1870 ; l'empereur était Louis-Napoléon Bonaparte (1808 – 1873) i.e. Napoléon III.

<sup>2</sup> Ibid., p193.

<sup>3</sup> Georges Claude, 1902.

<sup>4</sup> C. – C. Soulages, « Exposition Internationale d'Electricité : Galerie des machines : Alliance, Wilde, de Méritens », *La Lumière Electrique*, Volume 6, n°1-25, 1882, p515 à 518.

continu. Comme la présence du commutateur générait des pertes, on le retira et on le remplaça par un collecteur, la machine produisant ainsi du courant alternatif.

Après l'éclairage, la machine fut utilisée dans le domaine de la galvanoplastie. Pour cet usage, le courant devait être continu.

### 3. Les premières génératrices de courant, réversibles. La dynamo Gramme

La génératrice de la compagnie l'Alliance démontra qu'il était possible de se passer des piles, trop chères, pour produire du courant. Cependant, quand le courant produit était continu, les pertes générées au niveau du commutateur étaient importantes, et quand le courant était alternatif, la nature du courant produit était mal maîtrisée et il n'y avait encore aucun moteur à courant alternatif disponible. La machine de l'Alliance ne permettait donc pas d'alimenter des moteurs électriques.

Avec la dynamo Gramme, on passa au stade supérieur puisque cette machine était non seulement une source de courant de nature connue c'est-à-dire continu – l'année de sa présentation devant l'Académie des Sciences, on écrivait : « On parle beaucoup en ce moment d'une nouvelle machine électro-magnétique produisant des courants continus et pouvant, par conséquent, se substituer à la pile dans toutes ses applications industrielles et scientifiques »<sup>1</sup> – mais en plus de cela, elle était en même temps un moteur. A partir de 1873, date à laquelle la machine de Gramme fut présentée, les moteurs électriques entrèrent dans une deuxième période. Louis Figuier écrit en 1884 :

« La première [période] (...) n'a produit que des résultats négatifs ; et les déceptions éprouvées par nombre d'inventeurs qui s'étaient engagés dans cette voie, avaient complètement découragé leurs successeurs. La seconde période, qui s'étend de 1873 jusqu'au moment actuel, a été couronnée d'un succès à peu près complet. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> « Machine électro-magnétique Gramme », *Revue Industrielle*, 1871, p406.

<sup>2</sup> Louis Figuier, *ibid.*, p500.

### a) Réversibilité

Ainsi l'autre raison pour laquelle il fallut attendre l'invention des machines génératrices de courant pour avoir un moteur électrique à usage industriel et plus particulièrement de la machine Gramme, était tout simplement que cette dynamo était aussi un moteur électrique, c'est-à-dire qu'on pouvait inverser son fonctionnement : de machine productrice de courant électrique à partir d'un mouvement mécanique, elle pouvait aussi être machine productrice d'un mouvement mécanique à partir d'un courant électrique, c'est-à-dire un moteur. La dynamo et le moteur sont un seul et même appareil. On parlait de *réversibilité de la machine*.

L'emblème de la dynamo à cette époque, la dynamo Gramme, était construite avec un anneau en fer, entouré de plusieurs bobines de fil reliées entre elles et à un commutateur. L'anneau était placé au centre de la machine et tournait entre deux électro-aimants horizontaux placés en-dessous et au-dessus de l'anneau. Quand deux machines Gramme étaient reliées entre elles, l'une fonctionnait en génératrice, l'autre en réceptrice ou moteur, et leur anneau tournait dans des sens opposés.

Lorsqu'il conçut cette machine, Zénobe Gramme (1826 – 1901), d'origine belge, était employé de la compagnie l'Alliance<sup>1</sup>. Ceci explique pourquoi Robert Bonnefille, dans son article sur les débuts de l'électrotechnique, écrit qu'il avait été inspiré par la machine de l'Alliance pour la construction de sa machine. Il déposa un brevet en 1869 et la présenta devant l'Académie des Sciences en 1871<sup>2</sup>.

La démonstration de la réversibilité de la machine eut lieu lors de l'Exposition universelle à Vienne, en 1873. Hippolyte Fontaine (1833 – 1910), ingénieur en chef de l'entreprise Gramme, était en charge de l'installation électrique de l'entreprise. Une dynamo Gramme fournissait du courant pour éclairer des lampes et pour charger une batterie d'accumulateurs, inventée en 1859 par Gaston Planté (1834 – 1889). La batterie fournissait le courant à un moteur, qui activait un jet d'eau. Un visiteur non identifié suggéra à Hippolyte Fontaine de retirer la

---

<sup>1</sup> M. Barlet, « Rapport sur les procédés et les appareils de chauffage et d'éclairage », « Eclairage électrique », *Exposition universelle de 1878*, Paris : Imprimerie nationale, p55.

<sup>2</sup> Alfred Niaudet, « Machine magnéto-électrique Gramme à courants continus », *Revue Industrielle*, 1872, p162. A cette date, elle était encore composée d'un aimant permanent en face duquel tournait un électro-aimant en forme d'anneau. Très peu de temps après, l'aimant fut remplacé par un électro-aimant.

batterie et de connecter directement la dynamo au moteur électrique. Hippolyte Fontaine s'exécuta et l'effet produit fut que le jet d'eau était trop puissant. Pour y remédier, il fallait allonger le fil entre la dynamo et le moteur. Hippolyte Fontaine plaça donc un fil d'une longueur équivalente à un kilomètre entre les deux machines, et la puissance du jet d'eau obtenue devint appropriée<sup>1</sup>. Il réalisa ainsi la première expérience publique de transport de la force à distance au moyen de l'électricité<sup>2</sup>.

### *b) Concurrence avec les machines magnéto-électriques*

La machine de Gramme était initialement destinée à concurrencer la machine de l'Alliance et les piles électriques dans les domaines de l'éclairage et la galvanoplastie<sup>3</sup>. On évaluait d'ailleurs la tension du courant qu'elle produisait en fonction du nombre de piles qu'elle permettait de remplacer ; en 1873, « la tension électrique de cette machine atteint 105 éléments Bunsen ordinaires (...) »<sup>4</sup>. Dans l'usine de l'entreprise de galvanoplastie Christofle, pour remplacer des piles électriques, on eut recours aux machines Gramme dès leur sortie en 1873. Alfred Niaudet évoqua les économies suivantes : « On brûlera du charbon avec de l'air, au lieu de brûler du zinc dans des acides. L'économie qu'on réalise par ce changement de procédés est de 80 pour 100. »<sup>5</sup>

Le coût et l'encombrement trop élevés de machine de la compagnie l'Alliance la rendirent obsolètes face à la nouvelle machine Gramme, qui la concurrençait sur ces deux critères :

« Les savants électriciens Nollet et Van Malderen, promoteurs de la machine l'Alliance, tout en réalisant la machine qui semble aujourd'hui encore rivaliser avec succès avec les machines les mieux combinées, n'étaient cependant pas parvenus à répandre dans l'industrie leur invention remarquable.

Le prix élevé et le volume encombrant des machines ont été pour beaucoup dans la lenteur avec laquelle elles ont progressés.

---

<sup>1</sup> Thomas C. Martin, *ibid.* Henry de Graffigny parlait lui d'une distance de 500 mètres.

<sup>2</sup> Henry de Graffigny (1907), *Les moteurs électriques*, Paris : Librairie des publications populaires, p16.

<sup>3</sup> Théodose du Moncel, *ibid.*

<sup>4</sup> « Machine magnéto-électrique Gramme appliquée à la production de lumière », *Revue Industrielle*, mars 1873, p162.

<sup>5</sup> Alfred Niaudet, « Machine magnéto-électrique de Gramme », *La Nature*, 1873, p341 à 365, p344.

Il était donné à M. Gramme de propager la lumière électrique en rendant ces machines d'un volume restreint et d'un prix abordable. »<sup>1</sup>

Pour comprendre la différence entre une dynamo Gramme et une machine de la compagnie l'Alliance, il faut également nous intéresser à leurs aimants. La distinction entre machines *dynamo*-électriques et *magnéto*-électriques réside dans l'utilisation d'électro-aimants dans le premier cas, d'aimants permanents dans le second. Pour produire le champ magnétique nécessaire à la production du courant dans la machine, il fallait soit utiliser des aimants permanents, soit des électro-aimants, activés par une autre machine à courant continu. Initialement, on préféra les aimants permanents et donc les machines magnéto-électriques car utiliser deux machines pour obtenir une seule source de courant était perçu comme inefficace. Néanmoins les électro-aimants étant plus puissants que les aimants permanents, ils furent préférés aux aimants permanents lorsqu'il fut possible de se passer de la deuxième machine, qualifiée de machine excitatrice. Les machines dynamo-électriques devenaient ainsi auto-excitatrices. La découverte du principe d'auto-excitation mit fin à la construction de machines à aimants permanents<sup>2</sup>. Elle est due à l'électricien anglais Henry Wilde (1833 – 1919), qui eut l'idée en 1866 de remplacer les aimants permanents de la machine l'Alliance par des électro-aimants :

« Les personnes qui ont suivi les progrès introduits dans les machines magnéto-électriques depuis M. Wilde remarqueront que ces derniers perfectionnements consistaient au fond dans ce seul point, d'ailleurs fort important : les aimants excitateurs des machines Pixii et Clarke ont été remplacés par des électro-aimants beaucoup plus puissants, excités eux-mêmes par l'action de la machine. »<sup>3</sup>

La machine de Wilde, avec ses électro-aimants auto-excitateurs, produisait des courants alternatifs, comme la machine de l'Alliance. Elles étaient cependant plus compliquées à construire puisqu'il fallait transformé une partie du courant alternatif en courant continu pour qu'il puisse être envoyé dans les électro-aimants. C'est pourquoi, malgré l'arrivée des machines auto-excitatrices sur le marché, entre leur première utilisation aux deux phares de la Hève en 1863 et l'Exposition universelle de 1878 à Paris, la construction des machines de la

---

<sup>1</sup> M. Barlet, *ibid.*, p52.

<sup>2</sup> Edouard Hospitalier, « Moteurs et machines dynamo-électriques », *La Nature*, 1885, 2ème semestre, p75.

<sup>3</sup> Alfred Niaudet, *ibid.*, p343.

compagnie l'Alliance ne fut pas modifiée et on garda les aimants permanents<sup>1</sup>. Finalement, la puissance supérieure des électro-aimants fit qu'en 1878, cette entreprise fut rachetée par la *Compagnie parisienne de l'éclairage électrique*, qui présenta trois ans plus tard lors de l'*Exposition internationale d'électricité* en 1881 des machines de Wilde à électro-aimants auto-excitatrices.

### *c) Généalogie de la machine Gramme*

Dès la mise sur le marché de la dynamo Gramme, qui avait l'avantage d'être auto-excitatrice et de produire du courant continu, on chercha des antécédents aux éléments techniques qui la caractérisaient, à savoir le commutateur, la forme en anneau d'une de ses parties et sa réversibilité. En effet, deux de ses éléments de construction, le commutateur et l'anneau, étaient censés marquer une rupture avec la construction des précédentes machines électriques. Louis Figuier présenta le commutateur de la machine Gramme comme novateur et pourtant son fonctionnement était le même que celui des commutateurs précédemment décrits. D'ailleurs, dès la sortie de la machine en 1873, Théodose du Moncel rappela que le commutateur utilisé dans la machine Gramme destinée à l'éclairage « a été souvent employé dans les applications électriques, et n'est pas aussi nouveau que le suppose M. Gramme (...) »<sup>2</sup>.

On attribua également à Gramme l'invention d'une partie de la machine en forme d'anneau. Cependant le savant italien Pacinotti, professeur à l'université de Pise, en avait déjà eu l'idée. Le catalogue général de l'Exposition universelle de 1900 nous donne l'aperçu historique suivant de la découverte des machines à courant continu :

« (...) Le Nuevo Cimento avait publié en 1864 la description d'un petit moteur électrique de M. Pacinotti, dans lequel l'induit mobile était composé d'un grand nombre de spires enroulées autour d'un anneau en fer doux. (...) Pendant de longues années, le modèle de cette machine est resté à l'Université de Pise ; il figurait en 1881 à l'Exposition d'électricité. Comme petit moteur, l'appareil ne présentait aucune supériorité sur ses devanciers : aussi attira-t-il bien peu l'attention. Mais, par une expérience des plus intéressantes, M. Pacinotti avait reconnu qu'en plaçant sa machine entre les pôles

---

<sup>1</sup> Edouard Hospitalier, « L'éclairage électrique à l'Exposition d'Electricité. I. Les générateurs. II. Les foyers. L'éclairage par incandescence », *La Nature*, 1881, 2<sup>ème</sup> semestre, p280.

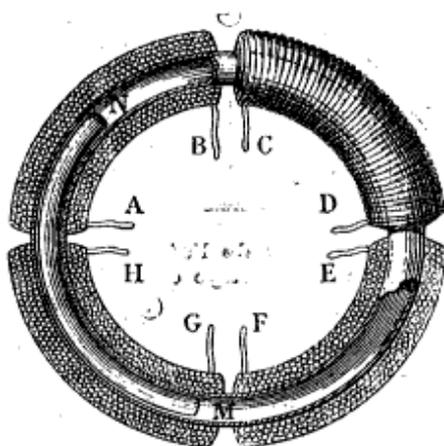
<sup>2</sup> Théodose du Moncel, *ibid.*, p541.

d'aimants permanents et en lui imprimant un mouvement de rotation, elle devenait une génératrice de courants continus et fonctionnait comme une véritable pile.

(...) La machine de Pacinotti fut réinventée par Gramme, en 1869, avec des modifications considérables au point de vue pratique : l'anneau denté massif faisait place à un anneau lisse en fils de fer ; des balais se substituaient aux galets ; le collecteur était construit tel qu'on le comprend actuellement, etc. Ainsi fut créée la dynamo industrielle (...). »<sup>1</sup>

Même Pacinotti avait son modèle, un certain Bessolo, qui construisit un moteur avec une partie en forme d'anneau en 1853 et qu'il breveta en 1855, soit 10 ans avant Pacinotti et 15 ans avant Gramme. Ce moteur inspira une trentaine d'années plus tard par Siemens, qui le rebaptisa « moteur à anneau ouvert »<sup>2</sup>. L'ingénieur des Ponts et Chaussées Frank Géraldy (1838 – 1893) faisant de l'histoire des sciences en 1883 dans *La Lumière Electrique* :

« Il est vraiment tout à fait curieux que certains appareils, extrêmement remarquables pour leur temps, aient passé tout à fait inaperçus lors de leur invention et soient entrés dès leur naissance dans un oubli d'où un hasard les fait sortir, quelquefois après de longues années, pour en faire des points intéressants de l'histoire de la science. C'était, comme on sait, le cas de la machine de Pacinotti, c'est aussi le cas du moteur Bessolo (...). »<sup>3</sup>



Moteur Bessolo

Source : Frank Géraldy, « Le moteur électrique de A. Bessolo. Le moteur électromagnétique à anneau ouvert de C. W. Siemens », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°49, 8 décembre 1883, p462 à 468, p462.

<sup>1</sup> « Musée rétrospectif du groupe V. Electricité. Appareils, - Livres - Manuscrits - Autographes », Catalogue général de l'Exposition universelle de 1900.

<sup>2</sup> Frank Géraldy, « Le moteur électrique de A. Bessolo. Le moteur électromagnétique à anneau ouvert de C. W. Siemens », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°49, 8 décembre 1883, p462 à 468.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p462.

Bessolo avait également réussi à anticiper la plupart des usages des moteurs électriques qui se développèrent à la fin du siècle puisque dans son brevet il précise que son moteur pourra avoir les utilisations suivantes : navigation, chemin de fer, chemins ordinaires, « ventilateurs et toute machine à grande vitesse », machine en général, navigation aérienne, navigation sous-marine, transmission à distance<sup>1</sup>.

Enfin, même Bessolo avait son modèle. En 1842, un savant hollandais nommé Elias pensa lui aussi à utiliser des électro-aimants en forme d'anneau. Son moteur était constitué de deux électro-aimants en forme d'anneaux concentriques. Chacun était constitué de six bobines de fil. L'anneau extérieur, fixe, était l'inducteur. L'anneau intérieur, mobile, avait les fils reliés à un commutateur qui inversait le courant 6 fois de manière à ce que l'anneau intérieur puisse tourner :

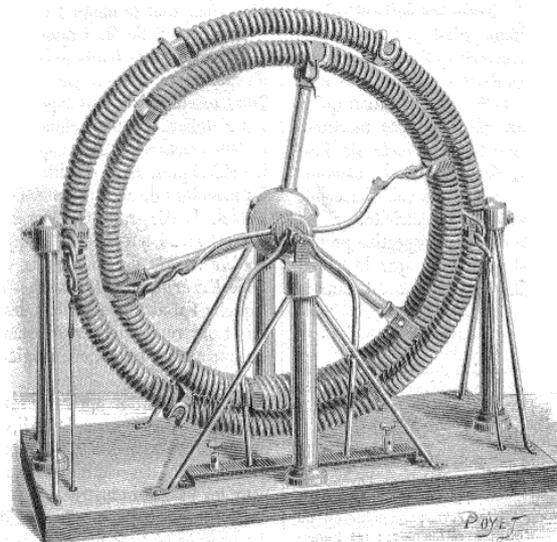


Fig. 1 -- Moteur d'Elias (1842).

#### Moteur Elias

Source : Edouard Hospitalier, « Moteurs et machines dynamo-électriques », *La Nature*, 1885, 2ème semestre, p75.

En ce qui concerne la réversibilité des machines électriques, elle était connue depuis quelques années déjà, notamment par l'électricien allemand Siemens (1867) ou par le savant italien Pacinotti (1861) : « A qui appartient la découverte de la réversibilité ? Il serait bien difficile de

---

<sup>1</sup> Ibid., p466.

le dire, mais on le trouve nettement formulé dans le mémoire publié en juin 1864 dans *Il Nuovo Cimento*, par M. Pacinotti. »<sup>1</sup>

Ensuite vinrent Zénobe Gramme et son associé l'industriel Hippolyte Fontaine qui démontrèrent les premiers qu'une application pratique de cette découverte était possible à l'Exposition de Vienne en 1873. Leur démonstration se fit selon les mots de l'ingénieur nord-américain Thomas C. Martin presque par accident, et malgré cela il accordait plus de crédit à Hippolyte Fontaine et à Zénobe Gramme qu'aux savants italien et allemand pour la découverte de la réversibilité de la dynamo, peut-être simplement parce que dans ce cas la démonstration fut publique et de grande envergure<sup>2</sup>.

Dès janvier 1882, juste après la fin de l'Exposition Internationale d'Electricité où plusieurs applications de l'électricité utilisée comme force motrice furent présentées, le collaborateur d'Hippolyte Fontaine au sein de la qu'il avait fondée, la *Revue Industrielle*, notait :

« Il a été rappelé au Congrès des électriciens que c'était à M. Hippolyte Fontaine, le fondateur de la *Revue Industrielle* que revenait l'honneur d'avoir le premier tracé la voie. Nous désirons bien faire comprendre le rôle rempli par M. Hippolyte Fontaine en cette circonstance. Il ne s'est pas borné, comme plusieurs l'ont affirmé, à réaliser une expérience pour démontrer l'exactitude d'une idée émise par une autre personne. Non, il a été, à proprement parler, l'initiateur d'une nouvelle branche industrielle. Il a eu, le premier, l'idée du transport des forces par l'électricité c'est également lui qui, le premier, a fait une application de cette idée »<sup>3</sup>.

En ce qui concerne la construction de la machine Gramme, il y avait effectivement des points communs entre celle inventée par Zénobe et celles de Pacinotti et Elias, mais elles n'avaient reçues aucune application industrielle : « Il ne suffit pas que la semence soit la même ; il faut qu'elle soit tombée dans une bonne terre et cultivée avec soin ; ici elle germera à peine, tandis qu'elle produira là une plante vigoureuse et des fruits abondants », lisait-on dans la revue *Engineering* en 1881<sup>4</sup>. En 1897, un professeur à Douai écrivait : « Si l'histoire est juste, elle mettra le nom de M. Fontaine à côté de ceux de Papin, Stéphenson et de Watt qui ont été les inventeurs et les promoteurs

---

<sup>1</sup> Edouard Hospitalier, « Moteurs et machines dynamo-électriques », *La Nature*, 1885, 2ème semestre, p76.

<sup>2</sup> T. C. Martin, *ibid.*, p43-44.

<sup>3</sup> H. Josse, « Electricité », *Revue Industrielle*, 4 janvier 1882, p1.

<sup>4</sup> Extrait cité par Ph. Delahaye, « Chronique », *Revue Industrielle*, 11 juin 1884, p237.

de la machine à vapeur »<sup>1</sup>. Si l'on admet comme ce professeur qu'un inventeur peut être une personne qui ouvre une nouvelle voie industrielle, alors nous verrons qu'elle fut quelque peu injuste. La distinction que fit l'économiste Joseph Schumpeter entre inventeur et innovateur nous permettra néanmoins de requalifier ce qui est décrit ici comme une injustice.

## **B) Quand la distance compte : construction du réseau, guerre des courants et effets sur les moteurs électriques (1881 – 1914)**

### *Introduction*

Comme nous venons de le voir, l'utilisation du moteur électrique dépendait du coût de production de l'électricité qui l'alimentait ainsi que de sa distribution, il est donc important de s'y intéresser. Dès les débuts de l'industrie électrique, il fut reconnu que pour transporter d'importantes quantités d'électricité sur de longues distances, il fallait utiliser des hautes tensions.

Une fois l'idée admise, parce que la matière l'imposait, elle eut dans un premier temps un coût trop élevé et ne put être mise en pratique. Nous verrons comment ces contraintes furent contournées techniquement et économiquement (choix du courant, continu ou alternatif, tarification). Se posait notamment le problème de l'isolation des câbles de transmission de la génératrice au moteur, et de l'isolation des fils à l'intérieur des machines. En plus de cela, il fallait résoudre le prix du cuivre (faillite du Comptoir d'Escompte) et l'adéquation entre la dépense d'énergie et sa consommation en bout de ligne (centralisation de la production).

---

<sup>1</sup> Emile Saillard, *Journal de Pontarlier*, 25 avril 1897.

## Origines de la centralisation de la production d'énergie électrique

Que l'énergie électrique soit utilisée par des particuliers ou dans l'industrie, la plupart des ingénieurs électriciens recommandaient l'installation d'une centrale avec canalisations, souterraines ou aériennes, allant jusqu'aux abonnés. En dépit des contraintes d'un tel mode de production, c'est dans cette direction que s'orienta la production d'électricité dès ses débuts dans l'industrie.

### *a) Incompétence des abonnés*

L'électricité aurait pu être produite directement sur place chez le consommateur. Une des raisons pour lesquelles ce ne fut pas le cas était qu'on considérait que ce dernier n'avait pas comme préoccupation première d'utiliser à pleine capacité son matériel, contrairement à un gestionnaire de centrale. Gustave Cabanellas par exemple, l'un des partisans du courant continu en France, soutenait l'idée que dans les installations individuelles, l'utilisation des matériaux n'était pas optimale<sup>1</sup>. Lucien Gaulard (1850 – 1888), qui inventa le transformateur, élément clé dans la construction du réseau en courant alternatif, considérait que les abonnés de l'électricité n'étaient pas assez compétents pour faire les réglages d'ajustement de la production à la consommation eux-mêmes : « Dans le principe, un générateur secondaire devait être placé chez chaque consommateur, de façon à permettre à chacun d'eux d'alimenter les lampes de tous systèmes et de toutes résistances ; mais, en réfléchissant que les consommateurs n'étaient peut-être pas suffisamment compétents pour grouper leurs appareils suivant leurs besoins, nous avons réuni trois de ces appareils en tension dans de petits locaux de 1mq de surface, et nous avons constitué ainsi des stations de distribution à potentiel constant pouvant alimenter chacune deux cent cinquante lampes environ. »<sup>2</sup>

On invoqua également l'idée que les coûts supportés par le particulier dans le cas d'une production décentralisée étaient trop élevés (achat d'un groupe électrogène, frais d'entretien des machines).

---

<sup>1</sup> Gustave Cabanellas, « Le transport à grande distance par l'électricité en vue de distribuer automatiquement l'énergie sous ses différentes formes: chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique ; par M. G. Cabanellas », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1885, p258 à 281, p277-278.

<sup>2</sup> Lucien Gaulard, « L'éclairage électrique de Tours », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1886, p107.

### *b) Centralisation de la production d'énergie thermique*

Pour Gilbert Simondon, « l'analogie est le fondement de la possibilité de passage d'un terme à un autre sans négation d'un terme par le suivant. »<sup>1</sup>. Cela rejoint le concept d'imitation de Gabriel Tarde, pour qui « (...) une innovation non imitée est comme n'existant pas socialement »<sup>2</sup>. Voilà pourquoi, reprenant l'argument de l'incapacité de l'abonné à gérer lui-même sa production d'énergie électrique, le journaliste scientifique Henri de Graffigny (1863 – 1934) expliquait : « Chaque particulier ne pouvant donc fabriquer lui-même la quantité d'électricité nécessaire à sa consommation, il était tout indiqué que l'on procédât comme pour l'eau et pour le gaz ; que des puissantes usines se montassent avec des moteurs économiques actionnant des dynamos en nombre convenable, et que des canalisations fussent installées pour amener au domicile de chaque consommateur, le courant devant alimenter les brûleurs. »<sup>3</sup>

Pour Gilbert Simondon aussi, la production centralisée de vapeur ou de gaz, rendue possible avec la révolution thermodynamique et l'exploitation du charbon, est à l'origine de la concentration industrielle dans le domaine de l'électricité. De là sont nées les centrales électriques. Et plus indirectement, de là sont venus les câbles, les pylônes et les ciments des barrages, fabriqués dans des usines thermodynamiques, qui ont permis de transporter de grosses quantités d'électricité<sup>4</sup>. Les métaux à haute perméabilité magnétique sont issus de la métallurgie, les câbles en cuivre et la porcelaine à haute résistance des isolateurs sont issus des tréfileries à vapeur et des fours à charbon. Ainsi la concentration thermodynamique a donné les moyens à la concentration électrique d'exister.

Elihu Thomson, l'un des pionniers de l'industrie électrique nord-américaine, faisait lui une analogie mais cette fois avec le réseau pétrolier :

---

<sup>1</sup> Gilbert Simondon, *ibid.*, p261.

<sup>2</sup> Gabriel Tarde, *ibid.*, p162.

<sup>3</sup> Henry de Graffigny (1907), *La Lumière électrique : générateurs d'électricité, dynamos et alternateurs accumulateurs, distribution de la lumière, éclairage à air, éclairage par incandescence*, volume 2 in Petite bibliothèque d'électricité pratique, 10 volumes, Paris : Librairie des publications populaires.

<sup>4</sup> Gilbert Simondon, *ibid.*, p84.

« Puisque l'on a établi de longs tuyaux pour le transport du pétrole, pourquoi n'en établirait-on pas pour le transport de l'énergie électrique, chaque fois qu'il sera possible de le faire avec économie ? Considéré au point de vue des potentiels élevés, le Niagara se rapproche chaque jour davantage des cités qui l'entourent. »<sup>1</sup>

Comme le notait Pierre Lemonnier, « à l'intérieur des limites imposées par le milieu physique, des choix restent possibles, dont la logique a peu à voir avec les connaissances « objectives » mises en œuvre. Les représentations sociales en jeu dans ces choix renvoient à bien d'autres domaines que celui des simples connaissances des principes physiques de l'action sur la matière »<sup>2</sup>.

Selon Lewis Mumford aussi, la centralisation de la production d'énergie électrique est issue de la production centralisée d'énergie thermique :

« Puisque la machine à vapeur demande un soin constant de la part du chauffeur et de l'ingénieur, les grandes unités ont un meilleur rendement que les petites. Au lieu de la vingtaine de petites machines qu'aurait exigé un travail dispersé, une seule grosse machine peut fonctionner continuellement. Ainsi la vapeur provoqua la tendance aux grandes usines, nécessaires déjà à la division du travail. La grande taille, rendue obligatoire par la nature de la machine à vapeur, devint le symbole du rendement. Les leaders industriels non seulement acceptèrent la concentration et le colossal comme un résultat d'expérience conditionné par la machine à vapeur, mais ils y virent un signe de progrès. Avec la grosse firme, le gros haut fourneau, on supposait que le rendement était directement proportionnel à la taille. Dire plus gros, c'était une autre manière de dire meilleur. »<sup>3</sup>

Pour expliquer cette généalogie de l'organisation industrielle de la production d'énergie, Lewis Mumford fit appel au concept de pseudomorphisme culturel défini par Oswald Spengler<sup>4</sup>, qui s'applique lorsqu'une organisation nouvelle, plutôt que d'être complètement nouvelle, reprend des normes de l'ancienne organisation. Exemple : « À cause des énormes

---

<sup>1</sup> Propos d'Elihu Thomson repris par Edouard Hospitalier dans l'article « Sur la limite pratique des hauts potentiels appliqués au transport de l'énergie électrique », *l'Industrie électrique*, 1892, p198.

<sup>2</sup> Pierre Lemonnier, 1996, *ibid*, p23.

<sup>3</sup> Lewis Mumford (1934), *Technique et civilisation*, Traduit par Denise Moutonnier (1950), Paris : Editions du Seuil, p151.

<sup>4</sup> *Ibid.*, p235.

intérêts investis dans les charbonnages, les sources d'énergie les meilleur marché n'ont pas suffisamment retenu l'attention des inventeurs. »<sup>1</sup>

Nous en avons un exemple avec ce fait datant de 1886 rapporté par le *Journal des usines à gaz* : « Une des principales maisons de machines à vapeur de Paris aurait, paraît-il, l'intention d'entreprendre à son compte des installations d'éclairage électrique ; on dit même que les débuts de cette entreprise vont avoir lieu dans les magasins de la Belle Jardinière. L'idée n'est pas neuve, elle est empruntée aux Anglais, qui agissent ainsi depuis quelque temps. »<sup>2</sup>

Comme les auteurs précédemment cités, Wolfgang Schivelbusch évoqua lui aussi la fluidité entre les techniques et donna la généalogie suivante concernant les techniques de production centralisée d'énergie, avec distribution par canalisations : on passa du réseau hydraulique, au réseau gazier, construit par imitation du réseau hydraulique, au réseau électrique, construit par imitation du réseau gazier. Le modèle d'approvisionnement en eau dans les maisons, depuis un lieu de production central, à l'aide de tuyaux, était antérieur à l'approvisionnement en gaz. On pouvait même remonter au système de chauffage central, connu depuis l'Antiquité romaine. Il nota qu'au fur et à mesure du temps, la section des canalisations diminua.

### *c) Eloignement de l'énergie primaire. Centrales hors des villes*

Selon que la centrale était installée proche des villes ou en montagne, l'énergie primaire n'était pas la même. Le choix de l'énergie primaire et de la machine à brancher derrière la dynamo pour la mettre en mouvement, appelée dans la citation qui suit « moteur », était déterminant pour le prix de l'électricité produite : « La partie essentielle de toute usine d'électricité est donc le moteur, et l'on conçoit que l'effort des ingénieurs se porte surtout sur les moyens susceptibles de diminuer à l'extrême le prix de la force motrice, d'où dépend celui du courant électrique. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid., p202.

<sup>2</sup> « La lumière électrique chez soi. - Petites nouvelles », *Journal des usines à gaz*, n°112, 20 avril 1886, p136-137.

<sup>3</sup> Henry de Graffigny (1907), *La Lumière électrique : générateurs d'électricité, dynamos et alternateurs accumulateurs, distribution de la lumière, éclairage à air, éclairage par incandescence*, volume 2 in Petite bibliothèque d'électricité pratique, 10 volumes, Paris : Librairie des publications populaires, p29.

A proximité des villes, l'électricité était produite à partir d'une machine à vapeur ou d'un moteur à gaz. En montagne, les combustibles étaient rares et la puissance hydraulique abondante. L'énergie primaire était donc hydraulique. Il fallait par contre que les techniques suivent et que le courant puisse être transporté économiquement des régions montagneuses jusqu'aux centre-ville. Ajouté à cela, l'espace dans les villes coûtait cher. A Paris par exemple, pour certains, un obstacle à l'installation de centrales électriques dans la ville était le manque de terrains mis à disposition par la municipalité, de même que le niveau trop élevé des impôts prélevés sur les bénéficiaires<sup>1</sup>. Pour beaucoup, cela revenait moins cher d'installer des centrales de grande dimension hors des centre-ville.

De plus, les centrales électriques utilisaient des machines à vapeur qui polluaient l'air et l'environnement sonore des citadins. Pour faire fonctionner la machine à vapeur, il fallait transporter des matériaux, du charbon, et nettoyer les déchets visibles, les cendres. Il était préférable de faire tout ça loin des centre-ville, malgré le coût des canalisations électriques<sup>2</sup>.

A côté de la commodité, il fallait également penser à la gestion du risque. Les tuyaux reliant la chaudière à la machine à vapeur pouvaient parfois exploser à cause de la pression. Cela avait pour effet d'augmenter le prix des assurances des immeubles.

Tous ces éléments favorisèrent la construction des centrales hors des centre-ville, au plus près de la source d'énergie primaire :

« Une fois qu'on s'était rendu compte que le courant à haute tension pouvait être transporté sur une grande distance sans perte notable de tension, un système se développa, en quelques années, qui ne rappelait en rien l'usine à gaz. La centrale électrique n'était plus construite dans la ville qu'il s'agissait d'approvisionner en courant, mais là où l'énergie nécessaire à la production du courant était la moins chère. Les nouveaux emplacements – bassins houillers, chutes d'eau, lacs d'accumulation – se trouvaient souvent à des centaines de kilomètres du lieu de consommation. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> *Journal des usines à gaz*, n°121, 5 septembre 1886, p274.

<sup>2</sup> *Journal des économistes*, 1894, Tome 19, p384 à 386.

<sup>3</sup> Wolfgang Schivelbusch (1993), *La Nuit désenchantée*, Paris : Gallimard, p64.

## *IV. Systèmes à courant continu : les limites du cuivre*

### **1. Débats autour de l'utilisation du cuivre selon Marcel Deprez**

#### *a) Gérer la distance de transport. Les propriétés du cuivre*

Jules Dupuit a écrit un mémoire sur la meilleure configuration à donner à un système de canalisations d'eau sur un territoire donné. Il trouva que plus la quantité d'eau transportée était élevée, moins son coût de transport était élevé. Il fallait donc que les canalisations aient une taille maximale. Dans le cas de l'électricité comme force motrice, les ingénieurs cherchaient eux aussi à minimiser son coût de transport. Ils s'intéressaient principalement à la démonstration de la faisabilité du transport à distance avec des fils déjà utilisés, les fils télégraphiques, dont les dimensions avaient été calculées par leurs prédécesseurs, les ingénieurs télégraphes.

En effet, le paramètre rapidement devenu le plus problématique dans la mise en place des centrales et dans le calcul de rendement des premiers systèmes de transport d'énergie électrique était la distance. Plus elle était grande, plus les pertes d'énergie électrique étaient élevées. Ceci était dû aux pertes d'énergie électrique sous forme de chaleur (loi de Joule), desquelles découlait la nécessité d'investir dans de grandes quantités de cuivre pour la constitution du fil de transmission.

Le physicien britannique James Prescott Joule (1818 – 1889), outre sa contribution à la découverte du concept de conservation de l'énergie, est reconnu pour avoir établi des lois permettant de mesurer les pertes de chaleur générées au passage d'un courant dans un circuit électrique. Il démontra qu'au passage d'un courant continu se dégage une certaine quantité de chaleur proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la résistance du conducteur. Dans le cas d'un fil électrique, cette résistance est proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à son diamètre.

La loi de Joule est déterminante dans les calculs de rendement des machines électriques, elle y trouve d'ailleurs son origine. Comme nous le rappelle Thomas Kuhn<sup>1</sup>, le but des premiers travaux du physicien britannique, de 1838 à 1841, était d'améliorer la conception des premiers moteurs électriques. Il explique qu'en 1840 notamment, ses recherches étaient caractérisées par une « évaluation systématique des moteurs en termes de travail et de duty »<sup>2</sup>, notion déjà évoquée qui était utilisée par les ingénieurs mécaniciens.

Joule trouva que plus la longueur d'un fil est grande, plus la résistance opposée au passage du courant électrique en son sein est forte ; et donc plus le rendement du dispositif est faible. Pour amoindrir cet effet, une solution est d'agrandir le diamètre du fil : plus il est épais, moins la résistance opposée au passage du courant est forte. Cependant un très long fil, de diamètre élevé, représente la configuration où la quantité de cuivre utilisée pour sa constitution est maximale. Or le cuivre a un coût déterminant pour l'ensemble du dispositif de transmission. Il s'agissait donc de minimiser la quantité de cuivre utilisée, ce qui se fait, pour une longueur de fil donnée c'est-à-dire une distance de transport du courant donnée, en minimisant la section du fil, tout en obtenant un rendement du dispositif de transmission suffisant pour qu'il puisse être utilisé industriellement. Voilà l'enjeu du débat qui se jouait durant la décennie 1880 pendant la construction des premières centrales.

Le cuivre fut utilisé par les ingénieurs électriciens qui ont construit le réseau de manière à pouvoir utiliser l'électricité sous forme de force motrice ce jusqu'aux années 1920, puis l'aluminium fut utilisé<sup>3</sup>. Les propriétés conductrices du cuivre en ont fait l'un des métaux les plus utilisés dès les débuts de l'industrie électrique. Il était utilisé pour transmettre le courant entre la centrale et le point d'utilisation, et à l'intérieur des machines électriques. Les enjeux économiques étant importants, les industriels et les savants se saisirent ensemble de ce matériau pour déterminer les méthodes les plus rationnelles permettant son extraction et son utilisation.

---

<sup>1</sup> Thomas Kuhn (1990), « Un exemple de découverte simultanée : la conservation de l'énergie » in *La Tension Essentielle*, Paris : Gallimard.

<sup>2</sup> Thomas Kuhn (1990), « Un exemple de découverte simultanée : la conservation de l'énergie » in *La Tension Essentielle*, Paris : Gallimard. Le « duty » était défini par des ingénieurs britanniques comme le rapport entre l'effet utile produit par une machine à vapeur et la quantité de charbon nécessaire à son fonctionnement.

<sup>3</sup> Magnien, « Le réseau électrique et les hommes », *Bulletin d'histoire de l'électricité*, n°7, juin 1986, p33 à 48, p45.

## *b) Point de vue de Marcel Deprez*

### *1. Août 1881 – Théorie fondamentale de Marcel Deprez*

On considère souvent que Marcel Deprez (1843 – 1918) posa les bases du transport de l'électricité à grande distance en France. Le défi principal de l'industrie électrique naissante était de parvenir à diviser le courant électrique issu d'une seule source, et de le transporter sur de longues distances. Le système de transport d'électricité que Marcel Deprez présenta à l'Exposition d'Electricité de Paris en 1881, un des premiers du genre en France et fondé sur l'utilisation du courant continu, s'inscrivait dans cette démarche. Le courant circulait d'une machine Gramme à une autre. Joseph Bertrand (1822 – 1900), secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences à partir de 1874 et soutien indéfectible de Marcel Deprez, affirma qu'avec ce système, ce dernier avait apporté la solution au problème du transport de l'électricité à distance. Il note : « M. Marcel Deprez a mérité, à l'exposition de 1881, la récompense exceptionnelle du grand diplôme d'honneur pour l'ingénieuse solution de ces problèmes. »<sup>1</sup> C'est ce type d'installation qu'il reproduisit, dans un premier temps de manière théorique puis de manière pratique, dans le but de déterminer le rendement d'un tel dispositif de transmission de force.

Pour éviter des frais d'établissement trop élevés liés à l'utilisation de câbles épais pour transmettre le courant électrique, Marcel Deprez choisit d'utiliser des fils télégraphiques classiques de 4 mm de diamètre environ. Cette économie faite diminuait cependant le rendement du système de transport de force par l'électricité : plus le fil séparant la génératrice du moteur était grande, plus le rendement du transport d'électricité était faible. Marcel Deprez ne le reconnaissait cependant pas complètement ; il était selon lui possible d'augmenter la distance de transport tout en maintenant la valeur du rendement. Pour cela, il fallait augmenter la tension du courant aux bornes de la génératrice et du moteur, proportionnellement à la racine carrée de la résistance du circuit.

---

<sup>1</sup> Joseph Bertrand, « Des Progrès de la Mécanique – M. Marcel Deprez », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°41, 13 octobre 1883, p204.

Pour obtenir ces hautes tensions, Marcel Deprez suggérait de diminuer le diamètre des fils à l'intérieur de la génératrice et du moteur, ce qui augmentait leur enroulement autour de l'anneau et des électro-aimants, et d'utiliser des machines de grande dimension.

L'enjeu était de démontrer, grâce au calcul de rendement, que l'électricité et plus précisément le courant continu était utilisable de manière économique pour le transport d'énergie à longue distance. Marcel Deprez exposa sa théorie au début de l'année 1881 devant l'Académie des Sciences, qui fut reproduite dans un article de la revue *La Lumière Electrique*, et attendit de réaliser ses expériences pour la confirmer ensuite. Cet article fit référence à son époque dans le domaine de l'électrotechnique et du transport de force à distance en courant continu. Dans une note de bas de page de leur ouvrage, les historiens François Caron et Fabienne précisent :

« Cet article de Deprez va ouvrir un débat en France par des notes publiées aux Comptes rendus de l'Académie des sciences (Paris), dont certaines seront reprises par *La Lumière Electrique*. Critiques de détails ou remarques sur les manières de mieux disposer les appareils dans un circuit ne semblent pas néanmoins abandonner le cadre de référence fixé par Deprez, dont l'autorité scientifique semble s'imposer. »<sup>1</sup>

## 2. Défense de l'indépendance du rendement de la distance et des hautes tensions

Pour Marcel Deprez, la distance de transport, même grande, n'était pas un problème puisque le rendement ne dépendait pas de la distance qui séparait la source d'électricité de son point d'utilisation. Cette idée allait à l'encontre de l'idée dominante partagée par ses collègues se penchant également sur la question du transport d'énergie électrique. Marcel Deprez le reconnaissait lui-même :

« Enfin, dans les récits des expériences les plus connues, faites sur ce sujet (Sermaize, Noisiel), on avait toujours donné à entendre que la distance était un élément très nuisible, et que plus elle était considérable, plus les conducteurs devaient être gros. Des savants étrangers amplifiant encore cette influence néfaste, allèrent jusqu'à écrire que pour transmettre au loin le travail des chutes du Niagara, il faudrait une quantité de cuivre dépassant tout ce que recèlent les gisements du Lac supérieur.

---

<sup>1</sup> François Caron et Fabienne Cardot, sous la direction de (1991), *Histoire Générale de l'Electricité, Tome Premier, 1881 - 1918*, Paris : Fayard, Note 17 p311.

J'avais donc, on en conviendra, quelque mérite à affirmer une vérité aussi méconnue. »<sup>1</sup>

Armé de sa théorie, Marcel Deprez calcula qu'il était possible, avec un rendement de 50%, de construire un circuit électrique qui recueillerait la puissance fournie par les chutes du Niagara, égale à 2 millions de chevaux-vapeur, et la transporterait sur une distance de 75 km à travers un fil de 13mm de diamètre. Il calcula que la génératrice de courant, qui recueillait les 2 millions de chevaux-vapeur fournis par les chutes, devait fournir une tension de 173 000 volts. Pour obtenir cette valeur, Marcel Deprez négligeait la résistance intérieure de la génératrice et du moteur, et ne prenait en compte que la résistance du fil de transmission.

Parallèlement au fait que le fil de transmission ne devait pas nécessiter une quantité de cuivre trop élevée pour maintenir le coût du système de transport raisonnable, il fallait aussi pouvoir transporter une quantité d'énergie électrique suffisante pour qu'elle puisse alimenter un moteur électrique et fournir de l'éclairage ou de la force motrice. Pour cela aussi, il était nécessaire d'utiliser des hautes tensions. En résumé, Marcel Deprez résolut le problème de la distance et du prix du cuivre en établissant des lois selon lesquelles la distance entre une source d'énergie électrique et son point d'utilisation n'affectait pas le rendement d'un dispositif de transmission d'énergie électrique, du moment que l'on utilisait des courants de hautes tensions, dont il fixait la valeur à 7000V. Marcel Deprez affirmait :

« Il est théoriquement certain qu'un fil d'un diamètre aussi petit qu'on voudra peut transmettre une quantité d'énergie illimitée, à la condition que la tension électrique soit d'autant plus élevée qu'il a une section plus faible (...). »<sup>2</sup>

Joseph Bertrand écrivait en 1883, en référence à la démonstration de Zénobe Gramme et Hippolyte Fontaine : « La possibilité de transporter la force par un fil conducteur, n'est plus, depuis dix ans au moins, contestée. Mais il faut pour cela, ou de gros fils ou de grandes tensions. On repousse la première condition par économie, la seconde par prudence. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Marcel Deprez, « La Transmission Electrique du Travail à Grande Distance », *La Lumière Electrique*, Volume 4, n°38, 10 août 1881, p179.

<sup>2</sup> Ibid., p179-180.

<sup>3</sup> Joseph Bertrand, *ibid.*, p202.

### 3. Saisir les choix de valeur dans les calculs de rendement – Préparatifs théoriques

Dans ses différents travaux, François Vatin a démontré que le rendement d'une entité se définit à partir de choix de valeur sociaux. On choisit uniquement deux variables, l'une que l'on met au numérateur et l'autre que l'on met au dénominateur<sup>1</sup>. On voit ici que Marcel Deprez fait le choix de ne pas faire apparaître le coût du cuivre dans le ratio. Il se proposait de résoudre le problème théorique et pratique suivant : pour une distance donnée (50km) et une puissance utile donnée (10 chevaux ou 7kW), quelle devait être la puissance fournie par une génératrice et quel allait être le rendement du dispositif ? Son hypothèse à vérifier était qu'en diminuant le diamètre des fils à l'intérieur de la génératrice et de la dynamo réceptrice, on pouvait compenser l'augmentation de la distance de transport. L'intérêt était double puisqu'avec des fils plus fins, la génératrice produisait des courants de tension plus élevée, et le volume de cuivre utilisé était limité.

Dans un premier temps, il chercha une réponse théorique à cette question. Il réalisa ses calculs à partir de valeurs numériques obtenues lors d'expériences commandées par le ministre de la guerre britannique et réalisées à l'Ecole du génie militaire de Chatham en Angleterre et trouva qu'il pouvait obtenir un rendement électrique de 53%<sup>2</sup>. Marcel Deprez commenta cette valeur ainsi : « Le rendement serait en réalité un peu moindre par suite des pertes de travail dues aux courants d'induction parasites, développés dans les masses métalliques en mouvement des deux machines, et des frottements, vibrations, etc... résultant d'un mouvement de rotation rapide. »<sup>3</sup>

Restait au savant à démontrer ces résultats expérimentalement. François Caron et Fabienne Cardot de commenter rétrospectivement : « On attend donc avec une certaine assurance la confirmation par l'expérience de la valeur du système Deprez. »<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> François Vatin, « Le produit de la nature et le temps des hommes : Don, service et rendement », Revue du MAUSS 2013/2 (n° 42), p. 221-245.

<sup>2</sup> Des expériences, commandées par le ministre de la guerre britannique, eurent lieu à l'école du génie militaire de Chatham en Angleterre. Bien que l'objectif fût de servir les intérêts militaires, les résultats furent également utilisés à des fins civiles. Cf. A. Guerrou, « Les Expériences de Chatham », *La Lumière Electrique*, 3, n°16, 16 avril 1881.

<sup>3</sup> Marcel Deprez, « La transmission électrique du travail à grande distance », *La Lumière Electrique*, Volume 4, n°38, 10 août 1881, p179-180 ; n°42, 24 août 1881, p246 à 248, p247.

<sup>4</sup> François Caron et Fabienne Cardot, *ibid.*, p308.

### *c) Critique de Maurice Lévy*

Maurice Lévy et Marcel Deprez ont à peu près simultanément sorti des travaux théoriques sur l'étude du transport d'énergie électrique à l'échelle industrielle. Le problème de la distance du transport était au cœur de leurs travaux. Maurice Lévy présenta trois communications devant l'Académie des Sciences aux séances des 7, 14 et 21 novembre 1881, en réponse à l'article de Marcel Deprez<sup>1</sup>. *La Lumière Electrique* publia également cette réponse de Maurice Lévy. Il reprenait certaines propositions de Marcel Deprez, contesta en grande partie ses arguments et proposait sa propre solution. Un point quand même sur lequel ils s'entendaient était la formule de rendement d'un système de transport d'énergie électrique. Nous verrons plus loin que cette formule fut pourtant contestée.

Maurice Lévy pensait que la valeur limite de 7000V proposée par Marcel Deprez était trop élevée : « Ne pourrait-on pas, par quelque autre transformation, soit obtenir un rendement meilleur, sans dépasser la vitesse de 2400 tours à la minute, de l'anneau, ni la force électro-motrice déjà énorme de 7000 Volts, admise par M. Marcel Deprez, soit, à rendement égal et égale vitesse de l'anneau, réduire cette force électro-motrice qui, M. Marcel Deprez le reconnaît lui-même, ne serait pas sans rendre l'isolement des fils quelque peu difficile ? »<sup>2</sup>

Pour Maurice Lévy, cette tension de 7000V ne garantissait pas l'obtention du meilleur rendement possible. Plutôt que d'utiliser une seule génératrice de grande dimension, il proposait d'utiliser plusieurs machines génératrices déjà disponibles dans l'industrie. Il proposait également d'utiliser du fil plus épais, plus cher qu'un fil de petit diamètre. Il souhaitait proposer une solution réalisable dans les conditions de l'époque : « Est-il possible de transmettre à n'importe quelle distance une quantité quelconque d'énergie, en obtenant un rendement donné d'avance aussi voisin de l'unité qu'on voudra, et cela en s'imposant la double condition : 1° de ne pas dépasser une force électromotrice donnée, condition sans laquelle il n'y a pas d'isolement ; 2° de n'utiliser que les machines fabriquées couramment dans l'industrie (par exemple,

---

<sup>1</sup> Maurice Lévy, « Arts Physique. Sur le Transport Electrique de l'Energie, par M. Maurice Lévy, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Professeur à l'Ecole Centrale, suppléant au Collège de France », *Bulletin de la Société d'Encouragement de l'industrie nationale*, 1882, p130 à 142, p132.

<sup>2</sup> Maurice Lévy, « Rendement du Transport de la Force par l'Electricité », *La Lumière Electrique*, 10 décembre 1881, p363.

les machines Gramme ou Siemens, même les plus petits types) ? »<sup>1</sup>

Cette solution, techniquement réalisable, requerrait cependant une plus grosse dépense, ce que Maurice Lévy commentait ainsi :

« (...) La résistance du circuit extérieur peut être rendu très petit, même pour de grandes distances, en prenant du fil très gros. C'est une question de dépense d'installation. Mais il est naturel, si l'on veut, par exemple, transmettre 50 chevaux à 100km, en exigeant un rendement, je suppose, de 80 pour 100, qu'un tel résultat se paye par une première mise de fonds. »<sup>2</sup>

Maurice Lévy se démarquait de Marcel Deprez pour qui l'usage de hautes tensions posait certes des problèmes d'isolation, mais n'était pas une contrainte indépassable. La solution de Maurice Lévy permettait de remplir l'objectif de transmettre une puissance utile donnée pour un rendement donné, à une distance plus élevée, tout en utilisant des machines déjà disponibles dans l'industrie. Utiliser plusieurs machines génératrices et plusieurs machines réceptrices présentait un autre avantage : il était possible de modifier le nombre de machines pour réguler quantité d'énergie distribuée. Maurice Lévy résuma les avantages de la disposition de son système de transport de force de la manière suivante :

« Il résulte de là qu'on peut réaliser dans des conditions aussi avantageuses qu'on le veut, au point de vue du rendement, les transmissions les plus importantes, comme les plus petites, à l'aide d'un ou deux types de machines, toujours les mêmes, par conséquent faciles à se procurer, faciles à remplacer. Si l'une d'elles est hors de service, les autres pourront y suppléer, si on élève temporairement la force électromotrice à laquelle on les fait travailler. Si l'on dispose d'un excès de force permettant de faire un sacrifice sur le rendement, on aura besoin d'un nombre relativement moindre de machines, et l'on pourra adopter du fil plus fin pour le circuit extérieur ; c'est l'inverse si l'on se trouve dans la nécessité de ménager la force.

Cette solution est donc extrêmement élastique ; elle se prête à toutes les exigences de la pratique, et est ainsi supérieure à toute solution qui serait fondée sur l'emploi de machines de dimensions exagérées. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Jules Sarcia, « Sur le Transport de la Force à Grande Distance », *La Lumière Electrique*, 10 mars 1882, p220-221.

<sup>2</sup> Ibid., p221.

<sup>3</sup> Ibid., p221.

*d) Critique faite par Jules Sarcia du système de transport d'énergie électrique de Maurice Lévy (mars 1882)*

*1. Problème du coût du fil de transmission*

Jules Sarcia, collaborateur de Marcel Deprez, se livra à une critique de la solution de Maurice Lévy<sup>1</sup>. Selon lui, cette solution semblait être une solution plus coûteuse que de simplement construire des machines électriques de plus grande dimension donc de plus grande puissance électrique avec du fil télégraphique de 4mm de diamètre<sup>2</sup>. Le prix du cuivre allait être beaucoup trop élevé dans la solution de Maurice Lévy. Jules Sarcia écrivait :

« Eh oui ! ce n'est que cela, une simple question de dépense d'installation et c'est précisément pour ce motif que les praticiens les plus routiniers, s'étant bien vite aperçus que le prix du conducteur croissait beaucoup plus rapidement que la distance à franchir lorsque, comme M. Lévy, ils ne voulaient rien changer aux conditions de fonctionnement des machines existantes, c'est pour ce motif, disons-nous, que ces praticiens ont déclaré ce mode de transport de la force inapplicable au-delà de quelque kilomètres. »<sup>3</sup>

Cherchant à calculer le prix du cuivre dans la solution de Maurice Lévy, Jules Sarcia considéra deux machines Gramme, l'une génératrice, l'autre moteur, séparées de 100 km et fournissant une puissance utile de 50 chevaux<sup>4</sup>. Il calcula qu'avec la solution de Maurice Lévy, cela revenait à utiliser 9 333 000 kg de cuivre. Le cuivre coûtant à l'époque 3 francs le kilo, au total, le fil de cuivre utilisé dans le système de Maurice Lévy allait coûter environ 28 000 000 francs. Si tous les autres coûts (des machines et du reste) étaient négligés et que seul le prix du fil servant à la transmission était pris en compte, il calcula que cela revenait à dépenser 560 000 francs par cheval transporté. Jules Sarcia concluait sur la question du cuivre ainsi :

« Ces chiffres laissent peu d'espoir de voir adopter le système préconisé par M. Lévy (...). Ils montrent mieux que tous les raisonnements la nécessité absolue de l'emploi de petits conducteurs et de hautes tensions. »<sup>5</sup>

Ce qui signifie que les frais d'isolation du fil lié aux hautes tensions devaient donc être a priori moins élevés que la dépense en cuivre liée à l'utilisation d'un fil de gros diamètre.

---

<sup>1</sup> Ibid., p221.

<sup>2</sup> Ibid., p222.

<sup>3</sup> Ibid., p222.

<sup>4</sup> La puissance électrique est qualifiée d'énergie par Jules Sarcia. La puissance électrique utile est qualifiée d'« énergie transportée ».

<sup>5</sup> Ibid., p222.

## *2. Problème lié au coût d'utilisation de plusieurs appareils générateurs*

Jules Sarcia jugea la solution proposée par Maurice Lévy trop coûteuse selon un second point de vue : l'utilisation de plusieurs génératrices au lieu d'une seule de grande dimension. Utilisant comme Maurice Lévy l'argument qu'un industriel pense d'abord de manière pratique, il pensait que posséder une machine de grande dimension fournissant un travail donné avait plus de sens que de posséder plusieurs machines de dimensions plus petites, fournissant la même quantité de travail, et notait :

« M. Lévy insiste en terminant sur les avantages qui résultent, selon lui, de la substitution d'un grand nombre de petites machines à une machine unique de puissance équivalente. Nous nous contenterons de faire remarquer que la tendance de tous les hommes qui s'occupent d'industrie est diamétralement opposée à cette opinion. Que dirait-on, pour ne citer qu'un exemple, d'un industriel qui, ayant besoin d'une force de cinquante chevaux, s'aviserait d'installer dans son atelier dix machines de cinq chevaux, agissant au moyen de dix courroies sur dix poulies clavetées sur le même arbre, sous le prétexte qu'une machine de cinquante chevaux aurait des dimensions « exagérées ? » »<sup>1</sup>

Marcel Deprez ayant réalisé avec Jules Sarcia des expériences visant à démontrer que les machines de grande dimension avaient un meilleur rendement, il se servit de leurs conclusions pour lui aussi apporter sa critique de la solution de Maurice Lévy :

« (...) Il faut, dis-je, renoncer aux errements suivis jusqu'à présent dans la construction des machines dynamo-électriques et ne pas craindre de leur donner des dimensions beaucoup plus grandes que par le passé. Il est évident d'ailleurs pour toute personne quelque peu familiarisée avec l'industrie que l'emploi de petites machines, comme on en voyait de nombreux exemples à l'Exposition, n'est qu'un pis-aller et que cet expédient n'a été employé jusqu'à présent par les constructeurs et vendeurs de machines dynamo-électriques que parce qu'ils ne prévoyaient pas eux-mêmes l'extension extraordinaire que prendront les applications de l'électricité. Peut-être aussi n'osaient-ils – faute de connaissances théoriques suffisantes – sortir des types qui leur avaient coûté de nombreux tâtonnements.

---

<sup>1</sup> Ibid., p223.

Mon intention n'étant pas de traiter à fond cette question dans cet article, je me bornerai à dire qu'il résulte dès à présent de mes recherches que les grandes machines sont très supérieures aux petites et comme production absolue et comme puissance relative par unité de poids.

Je dirai, en terminant, que ces expériences ont été faites avec le concours dévoué de M. Sarcia. »<sup>1</sup>

Joseph Bertrand, qui soutenait les travaux de Marcel Deprez, écrivait lui aussi : « Les années d'apprentissage sont terminées. Les petites machines sortent triomphantes de l'épreuve ; c'est aux grandes à entrer en lice. Ce n'est pas sept chevaux qu'il importe d'obtenir, l'industrie les demande par milliers. De nombreux cours d'eau vont chaque jour les plonger dans la mer, dont les marées sont prêtes à les faire sortir. Pour de grandes forces il faut de grandes machines. »<sup>2</sup>

### *e) Critique d'Oskar Frölich, ingénieur électricien allemand*

#### *1. Propos d'Oskar Frölich (février 1882)*

Oskar Frölich, électricien allemand, ingénieur chez *Siemens et Halske*, présenta un mémoire devant l'*Académie des Sciences* à Berlin le 18 novembre 1880. Il y décrivait des expériences faites chez son employeur relatives au transport d'énergie électrique. Un extrait fut publié dans *La Lumière Electrique* en juillet 1881<sup>3</sup>. Dans ce mémoire, Oskar Frölich critiquait la théorie de Marcel Deprez :

« Quant à la théorie de M. Deprez, je ne peux reconnaître ni qu'elle soit juste, ni qu'elle soit complète ; d'après mon opinion, elle contient de graves erreurs et de grandes lacunes, et je me permettrai d'en signaler les plus importantes. »<sup>4</sup>

#### *a) Plagiat*

Le premier point qu'Oskar Frölich critiqua était que Marcel Deprez ne citait pas du tout ses travaux, alors qu'ils portaient sur les mêmes thèmes, et que ceux d'Oskar Frölich étaient

---

<sup>1</sup> Marcel Deprez, « Recherches expérimentales sur les machines dynamo-électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 6, n°16, 22 avril 1882, p364 à 366, p366.

<sup>2</sup> Joseph Bertrand, *ibid.*, p204.

<sup>3</sup> Auguste Guérout, « Recherches sur la Machine Dynamo-Electrique faites chez MM. Siemens et Halske par le Dr O. Frölich », *La Lumière Electrique*, 4, n°28, 6 juillet 1881, p17 à 22.

<sup>4</sup> « Sur la théorie des machines dynamo-électriques et la distribution de l'énergie de M. Marcel Deprez par O. Froelich », *La Lumière Electrique*, 25 février 1882, p189.

antérieurs à ceux de Marcel Deprez. Ce dernier ne prenait notamment pas en compte les expériences qu'il avait réalisées :

« Quoique M. Deprez ait pris connaissance de mon mémoire, il ne fait nulle part allusion à nos résultats ; j'aurais cru que ces résultats méritaient d'être mentionnés, surtout parce qu'ils sont tirés de plusieurs centaines d'expériences relatives aux machines Siemens et Halske et Gramme, tandis que la seule expérience citée dans les articles de M. Deprez est une expérience des officiers de Chatham. »<sup>1</sup>

Oskar Frölich accusait également Marcel Deprez de plagiat. Dans le compte-rendu de ses expériences avec Jules Sarcia sur la taille des machines<sup>2</sup>, Marcel Deprez utilisa des « courbes caractéristiques », où l'intensité du courant produit par la machine était représentée en abscisse et l'intensité du champ magnétique en ordonnée. Marcel Deprez se revendiquait comme celui qui avait donné ce nom de « caractéristique » à cette courbe :

« Les considérations théoriques que j'ai exposées dans le numéro du 3 décembre 1881 de ce journal, et particulièrement la représentation graphique des effets des machines génératrices que j'ai nommée caractéristique, ont été depuis quelques mois le point de départ de recherches expérimentales très étendues. »<sup>3</sup>

Oskar Frölich revendiquait l'antériorité de la découverte : « La courbe représentant le magnétisme, que j'avais dressée en 1880 et qui fut appelée une année plus tard, par M. Deprez, « la caractéristique », représente la relation entre le magnétisme et l'intensité du courant. »<sup>4</sup>

Lors du Congrès des Electriciens organisé en 1881 en même temps que l'Exposition Internationale d'Electricité à Paris, Werner Siemens demanda explicitement à ce que le mémoire d'Oskar Frölich soit inséré dans le compte-rendu du Congrès juste après celui de Marcel Deprez, du fait des grandes similarités entre les travaux de Marcel Deprez et d'Oskar Frölich : « M. Siemens (Allemagne) déclare qu'il ne lui a pas toujours été possible de suivre l'exposé rapide de M. Deprez ; il lui semble toutefois que la question a été étudiée dans le même esprit en Allemagne par M. le Dr Frölich, et il dépose sur le bureau deux exemplaires de la *Elektrotechnische*

---

<sup>1</sup> Ibid., p188-189.

<sup>2</sup> Marcel Deprez, *ibid.*

<sup>3</sup> Ibid., p364.

<sup>4</sup> Oskar Frölich, « Sur le transport Electrique de la Force », *La Lumière Electrique*, Volume 8, n°12, 24 mars 1883, p364 à 376, p366-367.

*Zeitschrift* (livraisons d'avril et mai 1881), où se trouve le travail auquel il fait allusion. Il demande, si la communication de M. Deprez est insérée in extenso, que les articles de M. le Dr Frölich soient traduits et joints au compte rendu de la séance. (Voir Annexe II, page 104) »<sup>1</sup>. Il se trouve que la demande de Werner Siemens a été satisfaite.

*b) Problème de la dépendance entre rendement et distance*

L'autre critique qu'adressa Oskar Frölich à Marcel Deprez était que contrairement à ce qu'il essayait de démontrer, le rendement dépendait bien de la distance du transport de l'électricité :

« M. Deprez s'occupe beaucoup, dans la *transmission électrique de l'énergie*, de l'influence de la résistance de la ligne sur le rendement économique. Il paraît croire que le *rendement* soit *indépendant de la résistance de la ligne*. Nous avons démontré par nos expériences que le rendement se diminue considérablement par la résistance, et j'ai donné la formule pour cette diminution. »<sup>2</sup>

*c) Usage des hautes tensions*

Enfin, Oskar Frölich n'était pas favorable à l'utilisation de hautes tensions comme Marcel Deprez le préconisait :

« La question principale sera toujours celle des tensions ; employer de minces conducteurs, c'est employer de faibles courants et de hautes tensions ; et les dernières peuvent produire des effets funestes dans les machines et dans les lignes. »<sup>3</sup>

## *2. Réponse de Marcel Deprez à Oskar Frölich (février 1882)*

*a) Liens science – industrie*

La réponse de Marcel Deprez parut dans la même revue *La Lumière Electrique*. Il y expliqua que s'il avait choisi de ne pas faire référence aux expériences d'Oskar Frölich réalisées avec

---

<sup>1</sup> Ministère des Postes et Télégraphes, *Congrès international des électriciens. Comptes rendus des travaux*, 1881, Paris : G. Masson, p80.

<sup>2</sup> Sur la théorie des machines dynamo-électriques et la distribution de l'énergie de M. Marcel Deprez par O. Froelich, *La Lumière Electrique*, 25 février 1882, p189.

<sup>3</sup> Ibid.

l'entreprise *Siemens et Halske*, c'était à cause de leurs liens avec l'industrie qui pouvaient biaiser les résultats obtenus :

« Lorsque j'ai eu à choisir une expérience pour donner un exemple numérique, j'ai pris un des résultats de Chatham, parce qu'ils ont été obtenus par un corps d'officiers indépendants, en dehors de toute préoccupation industrielle, et qu'il m'offrirait toutes garanties d'exactitude. »<sup>1</sup>

*b) Problème de la dépendance entre rendement et distance explicité par Marcel Deprez*

De plus, il précisa qu'il reconnaissait que la distance influait sur le rendement, mais que cette influence pouvait être contrôlée grâce à des dispositions particulières :

« En ce qui concerne la transmission de l'énergie, M. Froelich voit avec regret que je parais croire le rendement indépendant de la distance. Je fais mieux que de le croire, j'en suis sûr, et j'ai démontré que cela était vrai, mais pas au sens absurde que m'attribue l'ingénieur allemand : il n'y a pas besoin d'expériences pour comprendre que deux machines données, marchant toujours dans les mêmes conditions, ne donneront pas le même rendement à toutes les distances. Ce n'est pas ce que j'ai dit ; j'ai dit qu'en se plaçant dans des conditions que j'ai indiquées, on peut toujours obtenir un travail déterminé avec un rendement déterminé quelle que soit la distance ; j'ai expliqué par quel moyen, j'ai pris soin de montrer que ce principe était général quelle que fût la nature du travail transmis : je ne puis refaire ici la démonstration pour M. Froelich qui ne l'a pas comprise : elle est pourtant bien simple. »<sup>2</sup>

Les conditions particulières recommandées par Marcel Deprez pour annuler l'effet de la distance étaient l'usage de hautes tensions produites par des machines de grande dimension.

*c) Usage des hautes tensions*

Marcel Deprez était effectivement favorable à l'usage de hautes tensions pour le transport d'énergie électrique à distance, mais ne croyait pas à leur dangerosité puisqu'il les manipulait régulièrement :

---

<sup>1</sup> Réponse de Marcel Deprez à O. Froelich, *La Lumière Electrique*, 25 février 1882, p190.

<sup>2</sup> Ibid.

« Les hautes tensions nécessaires pour les transports lointains effrayent beaucoup M. Froelich qui pense qu'elles tueront les hommes et détruiront les câbles : qu'il se rassure, je fais journallement usage de tensions qu'il n'a jamais atteintes ; les hommes et les câbles se portent bien. »<sup>1</sup>

Dans un article paru en novembre 1882 dans *La Lumière Electrique*<sup>2</sup>, le secrétaire de rédaction de la revue Frank Géraldy évoqua également la peur qui existait à l'égard des hautes tensions, tout en précisant que selon lui ce sont plutôt les intensités de courant élevées qui devaient être l'objet de craintes. Et dans le cas du système de Marcel Deprez, cette crainte était écartée puisque les courants utilisés étaient de faible intensité.

Les points sur lesquels l'ingénieur allemand et l'ingénieur français étaient en désaccord étaient ceux sur lesquels la communauté des électriciens réfléchissaient à cette époque, à savoir la question du rendement des systèmes de transport d'électricité et sa relation avec la distance de transport, l'usage des hautes tensions et de manière plus générale les liens entre intérêts industriels et résultats scientifiques. Cette querelle franco-allemande eut des conséquences pratiques, qui vont nous ramener à des débats franco-français, entre de nouveau Marcel Deprez et Maurice Lévy.

### *3. Effets de la brouille entre la maison Siemens et Marcel Deprez : victoire de Maurice Lévy (juin 1882)*

Marcel Deprez avait prévu d'installer son système de distribution d'énergie électrique au Pavillon de Flore, à Paris<sup>3</sup>. Cette installation devait être conforme à sa théorie exposée devant l'Académie des Sciences et dans *La Lumière Electrique*. Les machines de l'installation électrique, choisies par les ingénieurs de la ville de Paris, et a priori non par le savant lui-même, étaient du type Siemens.

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> Frank Géraldy, « Exposition Internationale d'Electricité de Munich – A Propos de l'Expérience du Transport de la Force », *La Lumière Electrique*, n°43, 28 octobre 1882, p424-425 et n°44, 4 novembre 1882, p448-449.

<sup>3</sup> Correspondance de Marcel Deprez, *La Lumière Electrique*, n°25, 24 juin 1882, p598-599.

Dans une correspondance du 24 juin 1882 publiée dans *La Lumière Electrique*, Marcel Deprez suggère que l'entreprise Siemens aurait sciemment empêché la réalisation de son installation dans les conditions exactes qu'il recommandait.

Selon la théorie de Marcel Deprez, ces machines devaient subir quelques modifications pour fonctionner dans les meilleures conditions. Le fil devait être plus fin de manière à pouvoir produire de hautes tensions, dans la limite des 7000V. Il adressa sa demande directement aux concepteurs, qui fut apparemment ignorée. Lorsqu'il accepta finalement de réaliser son installation avec les machines Siemens et leurs caractéristiques d'origine, l'entreprise Siemens fit déplacer sans l'autorisation de Marcel Deprez la machine génératrice de son laboratoire jusqu'au Pavillon de Flore où devait avoir lieu l'expérience, alors que ses tests n'étaient pas encore terminés. Ces événements amenèrent le savant français à renoncer à son installation au Pavillon de Flore. À sa place, c'est Maurice Lévy qui réalisa l'installation, avec son système de distribution où plusieurs génératrices devaient être utilisées plutôt qu'une seule.

Marcel Deprez commença à s'intéresser aux innovations de l'entreprise *Siemens & Halske* dès 1878, lorsqu'il utilisa la réversibilité de la machine dynamo-électrique de Siemens, et la transforma en moteur. Dans *La Lumière Electrique*, on apprend que Marcel Deprez « fut le premier à signaler les grandes qualités que cette machine présente comme moteur, et la munit d'un régulateur de vitesse. »<sup>1</sup> D'après Henry de Graffigny aussi, Marcel Deprez fut en France l'un des premiers à avoir utilisé les bobines Siemens, qui avaient la forme d'un double T, dans la construction d'un moteur électrique<sup>2</sup>. Il consistait en un aimant permanent en forme de fer à cheval placé au-dessus d'une bobine Siemens. Ces moteurs étaient destinés à alimenter des machines à coudre où il remplaçait le mouvement du pied, des tours de dentiste ainsi que d'autres petits instruments. En 1881, lors de l'Exposition Internationale d'Electricité de Paris, un modèle fut exposé dans la vitrine de Jules Carpentier, qui avait racheté en 1878 les ateliers du constructeur d'instruments Heinrich Ruhmkorff suite à sa mort en 1877. L'ingénieur électricien Gustave Trouvé (1839 – 1902) avait également inventé un petit moteur électrique

---

<sup>1</sup> Auguste Guérout, « Exposition Internationale d'Electricité. Les moteurs électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 4, n°43, 27 août 1881, p262 à 264, p262.

<sup>2</sup> Henry de Graffigny (1907), *Les moteurs électriques : moteurs à courant continu et à courant alternatif, synchrones, asynchrones, à champ tournant...*, Paris : Librairie des publications populaires, p10.

du même type, présenté à la même Exposition et installé sur le gouvernail d'un bateau électrique conçu par Gustave Trouvé qui circulait dans le bassin central de l'Exposition. Deux autres modèles étaient également présentés dans la vitrine de Gustave Trouvé.

Marcel Deprez s'inspira également d'un « mesureur d'énergie » conçu par l'inventeur et homme d'affaires Thomas Edison (1847 – 1931), qui permettait comme son nom l'indique de mesurer l'énergie consommée chez les abonnés de l'électricité, pour construire le sien en 1880<sup>1</sup>. Pour le professeur et ingénieur électricien Edouard Hospitalier (1852 – 1907) cependant, cette invention de Marcel Deprez n'en était pas tout à fait une puisque la société allemande *Siemens & Halske* avait déjà inventé le même appareil au moment où Marcel Deprez annonçait le sien<sup>2</sup>. Édouard Hospitalier avait lui-même décrit les appareils en question dans la revue *La Lumière Electrique*<sup>3</sup>. Il écrivait : « Le jour où M. Marcel Deprez construira et graduera un appareil réellement industriel, nous le décrirons volontiers, car c'est sans enthousiasme que nous allons chercher les bons appareils chez nos voisins ; il nous serait plus agréable de les voir se produire chez nous. »<sup>4</sup> Avant de conclure : « Nous avons en assez haute estime le mérite de M. Marcel Deprez, et nous le savons assez occupé de ses travaux personnels, pour lui permettre d'ignorer parfois ceux des autres. »<sup>5</sup>

Le ton de la réponse de Marcel Deprez à cet article est à peu près le même, et se finissait ainsi : « Il [Edouard Hospitalier] me décerne, en terminant, un petit éloge légèrement sarcastique dans lequel il m'accuse d'être trop absorbé par mes recherches personnelles et d'ignorer celles des autres. C'est un reproche que nul, je pense, ne songera à lui adresser. »<sup>6</sup>.

En parcourant la section « Correspondance » des revues, ou directement dans les articles scientifiques, on s'aperçoit qu'il n'était pas rare que les auteurs s'attaquent ainsi directement.

---

<sup>1</sup> Marcel Deprez, « Le mesureur d'énergie », *La Lumière Electrique*, Volume 2, n°7, 1er avril 1880, p133 ; n°9, 1<sup>er</sup> mai 1880, p170-171.

<sup>2</sup> Dès 1879, le physicien américain Amos Dolbear (1837 – 1910) était déjà l'inventeur d'un appareil similaire.

<sup>3</sup> Edouard Hospitalier, « Galvanomètre de torsion de MM. Siemens et Halske », *La Lumière Electrique*, n°19, 1er octobre 1880, p396-397.

<sup>4</sup> Édouard Hospitalier, « À propos des mesureurs de courant de M. Deprez », *La Lumière Electrique*, Volume 2, n°23, 1<sup>er</sup> décembre 1880, p488.

<sup>5</sup> Ibid.

<sup>6</sup> Lettre de M. Marcel Deprez, *La Lumière Electrique*, Volume 2, n°24, 15 décembre 1880, p511.

Cette fois-ci Oskar Frölich prit la défense de Marcel Deprez. Il rappela que bien qu'inventé par Siemens, Marcel Deprez fut le premier à l'utiliser pour mesurer directement la puissance électrique entre deux points d'un circuit. Avant cela, il était utilisé différemment en Allemagne et servait à mesurer des résistances<sup>1</sup>.

## 2. Premières expériences de Marcel Deprez. Lutte entre les mécaniciens et les électriciens

Abordons maintenant les expériences que réalisa Marcel Deprez pour démontrer que l'électricité pouvait être transportée à grande distance en utilisant du courant continu. Elles devaient lui permettre de vérifier empiriquement ses théories (indépendance du rendement, fil fin à l'intérieur des machines, machines de grande dimension). La première expérience eut lieu en 1882 en Allemagne, entre Miesbach et Munich, villes distantes de 57 kilomètres. Comme pour tous les travaux de Marcel Deprez, un rapport fut rédigé dans *La Lumière Electrique* par l'un des fondateurs de la revue déjà mentionné, Théodose du Moncel. Les mesures de rendement ne purent être prises du fait du mauvais fonctionnement du système mis en place. La même expérience fut alors reproduite en France sur une plus courte distance (17 kilomètres) entre la Chapelle et le Bourget en février 1883. Un rapport fut aussi publié dans *La Lumière Electrique*, et écrit par un autre membre fondateur de la revue, l'homme d'affaires Cornélius Herz (1845 – 1898). Marcel Deprez réalisa une troisième expérience en août 1883 entre Vizille et Grenoble sur une distance de 14 kilomètres. La quatrième fut réalisée en 1885 entre Paris et Creil sur une distance de 56 kilomètres.

### a) Différence entre rendement électrique et rendement mécanique

Il faut préciser ici que le rendement d'un moteur électrique ou d'un système de transport de force à distance par l'électricité pouvait être de deux sortes, électrique ou mécanique.

---

<sup>1</sup> Oskar Frölich, « Sur le transport électrique de la force », *La Lumière Electrique*, Volume 8, n°12, 24 mars 1883, p364 à 376, p376.

Théodose du Moncel donna la définition du rendement *mécanique* d'un système de transport d'énergie électrique à distance, constitué de deux machines, l'une génératrice, l'autre moteur et reliées par un fil électrique : « Le rendement d'une machine électro-motrice par rapport à une autre qui la met en mouvement est exprimé par le rapport du travail mécanique utile que développe la seconde au travail absorbé par la première. »<sup>1</sup> Théodose du Moncel rappelle que « ce terme a toujours eu en mécanique une signification parfaitement définie longtemps avant qu'il fût question de moteurs électriques. »<sup>2</sup>

Le rendement *électrique* était défini comme la puissance électrique du moteur divisé par la puissance électrique de la génératrice. Dans ce rendement, les pertes par frottements (pertes d'énergie ayant une cause mécanique) ne sont donc pas mesurées, de même que les pertes par effet Joule sur la ligne de transport ne le sont pas directement non plus.

Cette influence de la mécanique, présente chez Jacobi comme nous l'avons vu en première partie et certainement chez d'autres ingénieurs électriciens, peut aussi s'expliquer par la difficulté à mesurer des phénomènes spécifiquement électriques. Pour l'économiste Nicholas Georgescu-Roegen, l'électricité, contrairement à la mécanique, est un domaine de la physique où les variables à mesurer ne peuvent pas être appréhendées par les sens. D'où la nécessité préalable d'avoir les instruments adéquats à la mesure de variables électriques avant que ce domaine ne puisse se développer théoriquement<sup>3</sup> :

« L'extension d'une structure théorique à d'autres domaines rencontre des difficultés encore plus grandes. Ceci est spécialement clair dans le cas de l'électricité, où toutes les variables de base sont mesurées instrumentalement et aucune n'est reliée directement à un organe des sens – ainsi que le sont la plupart des variables des autres branches de la physique. Il est parfaitement naturel que l'invention d'instruments spéciaux pour mesurer les variables électriques ait demandé davantage de temps. L'électricité plus que les autres branches, n'avancait chaque fois qu'autant que chaque instrument de mesure pouvait déblayer un espace supplémentaire. Le contraire est vrai pour la mécanique ; ses progrès n'étaient pas freinés par le problème de mesure. »<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> Théodose du Moncel, « Le Rendement Electrique », *La Lumière Electrique*, 7, n°49, 9 décembre 1882, p551.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p553. Cf. François Vatin (1993), *Le travail, économie et physique (1780 – 1830)*, Paris : PUF.

<sup>3</sup> Georgescu-Roegen, Nicholas (1969), *La science économique. Ses problèmes et ses difficultés*, Paris : Dunod.

<sup>4</sup> *Ibid.*, p49.

Qu'ils soient électriciens ou mécaniciens, Bernard Grall trouva que l'étalon de valeur utilisé par les ingénieurs pour mesurer un effet utile se définissait toujours par le produit d'une valeur intensive (force) par une valeur extensive (distance ou quantité). En mécanique, c'était *Force \* Distance*. En électricité, c'était *Tension du courant* (également qualifiée de force électromotrice) \* *Intensité* (ou quantité, ou débit d'électricité).

La puissance étant égale au produit de la tension par l'intensité, le rendement électrique, égal au rapport de la puissance utile par la puissance dépensée, était aussi égal au rapport de la tension du moteur sur la tension de la génératrice lorsque l'intensité du courant était maintenue constante. Marcel Deprez supposait dans ce cas que tension et vitesse d'une machine électrique étaient proportionnelles. Il prenait donc également, comme formule de rendement électrique, le rapport entre la vitesse du moteur et la vitesse de la génératrice.

L'objectif de rendement de 50% que Marcel Deprez s'était fixé correspondait au rendement *mécanique*. De manière générale, il chercha à démontrer que plus la vitesse de la génératrice de courant était grande, plus la puissance électrique du moteur électrique et plus le rendement électrique du système dans son ensemble l'étaient aussi. Dans une expérience préliminaire au CNAM le 15 juin 1882, Marcel Deprez fit passer la vitesse de la génératrice, de 1530 tours/minute à 1737 tours/minute, et celle du moteur électrique, de 1110 tours/minute à 1400 tours/minute, ce qui permit au rendement de passer de 72% à  $1400/1737 = 80\%$ . Le moteur électrique avait une puissance électrique de 0,53 chevaux-vapeur et la ligne de transmission était longue de 4 km avec une résistance de 500 Ohms, soit l'équivalent d'un fil télégraphique ordinaire de 4mm de diamètre et 50 km de long. Son collaborateur Jules Sarcia concluait sur ces expériences de la manière suivante : « On voit donc que la pratique a donné complètement raison aux idées théoriques de M. Marcel Deprez sur le transport de l'énergie à grande distance. »<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Section « Faits divers », p599 : « Conférence de M. Marcel Deprez sur le transport et la distribution de l'énergie », *La Lumière Electrique*, n°25, 24 juin 1882, p23.

## *b) Débat sur les calculs de rendement. Opposition entre mécaniciens et électriciens*

*I. Septembre 1882 – Munich. Première expérience publique de Marcel Deprez, entre Miesbach et Munich, en Allemagne*

### *a) Description*

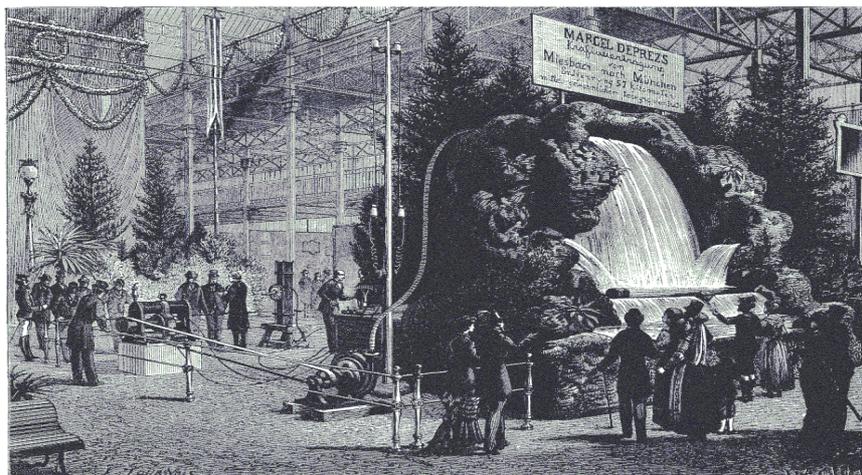
La première expérience de grande envergure qui suivit l'exposé théorique de Marcel Deprez et son expérience au CNAM consista à transporter de l'électricité depuis Miesbach jusqu'à l'Exposition universelle de Munich sur une distance de 57 km. Cette Exposition internationale d'électricité allemande fut organisée par l'ingénieur allemand Oskar von Miller en réponse à celle de Paris l'année précédente.

En juillet 1882, *La Lumière Electrique* annonça dans sa section « Faits divers » l'imminence de cette expérience. L'objectif initial de Marcel Deprez était d'actionner un moteur électrique qui devait mettre en mouvement une machine agricole installée dans le bâtiment de l'Exposition, en transportant le courant depuis Augsburg, ville située à 64 km de Munich<sup>1</sup>. Finalement, le programme initial ne fut pas suivi et le courant servit finalement à mettre en mouvement une pompe à eau actionnant un jet d'eau situé, comme dans l'expérience d'Hippolyte Fontaine à Vienne neuf ans plus tôt : « La machine réceptrice placée dans le palais de Cristal a mis en mouvement pendant huit jours une pompe centrifuge alimentant une cascade d'environ 2,5m de hauteur. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Section « Faits divers », « Projet de transport Electrique de la force de Munich à Augsburg, par M. M. Deprez », *La Lumière Electrique*, n°30, 29 juillet 1882, p120.

<sup>2</sup> Théodose du Moncel, « Transport de la force par une ligne télégraphique entre Munich et Miesbach », *La Lumière Electrique*, n°5, 3 février 1883, p129 à 132, p130.



Source : Théodose du Moncel, « Transport de la force par une ligne télégraphique entre München et Miesbach », *La Lumière Electrique*, n°5, 3 février 1883, p129 à 132, p131.

La commission en charge d'évaluer les expériences de Marcel Deprez, la « Commission d'essai pour les expériences électro-techniques du palais de Cristal de München » était munichoise ; son président était le docteur V. Beetz, son vice-président, Friedrich Haenle, ses secrétaires, Oskar von Miller et Josef von Schmaedel. Le procès-verbal officiel rédigé par la commission fut retranscrit dans un article de *La Lumière Electrique* rédigé par Théodose du Moncel, qui soutenait Marcel Deprez, ses théories et ses tentatives de validation expérimentale. Avant de donner la retranscription du procès-verbal, il nota :

« Nous avons exprimé nous-même, à plusieurs reprises d'une façon suffisamment explicite, notre opinion sur cette expérience « importante dans l'histoire de l'électro-technique, » comme le dit le procès-verbal, pour qu'il nous soit permis d'exprimer ici toute la satisfaction que nous cause la confirmation officielle de l'éclatant succès remporté par notre compatriote. »<sup>1</sup>

Le courant était produit par une machine Gramme, mise en mouvement par une machine à vapeur, et transporté par un fil télégraphique de 4.5mm de diamètre. A l'arrivée, le moteur était une machine Gramme identique à la génératrice. La puissance mesurée à la sortie du moteur était de 0.5 cheval<sup>2</sup>. Marcel Deprez tenta de donner la vitesse la plus grande possible à la génératrice car selon sa théorie, plus sa vitesse était grande, plus le rendement du système dans son ensemble était élevé. Il réussit à lui donner une vitesse de 2000 tours par

<sup>1</sup> Ibid., p129.

<sup>2</sup> Ibid., note 1 page 132.

minute, ce qui eut pour effet de « détruire complètement la machine »<sup>1</sup>. Après réparations, la vitesse maximale atteinte fut de 1600 tours par minute, correspondant à une tension de 1300V. Côté moteur, la vitesse était de 752 tours par minute, soit un rendement *électrique* de  $752/1600 = 46\%$ . On releva qu'une grande partie de la puissance reçue était perdue en vibrations, le socle sur lequel il était installé n'étant pas assez solide<sup>2</sup>. Après huit jours de mise en marche, les machines furent endommagées. Dans le procès-verbal, la raison invoquée était que les machines utilisées étaient des machines de laboratoire, non destinées à une utilisation prolongée. Les réparations furent faites, avec quelques difficultés notamment à Miesbach à cause de son éloignement géographique<sup>3</sup>.

*b) L'absence de mesures mécaniques rend la communauté électrique sceptique*

Les résultats obtenus par Marcel Deprez lors de sa série d'expériences à Munich furent l'objet de vives critiques de la part de certains électriciens français. Cornelius Herz chercha dans un article paru dans *La Lumière Electrique*, en les qualifiant d' « attaques hargneuses et grotesques »<sup>4</sup>. Il écrivait, avec une touche de mépris :

« Ces attaques viennent d'ailleurs d'hommes qui avaient conquis, il faut le reconnaître, une notoriété modeste mais méritée, en publiant depuis plusieurs années des articles intéressants sur la physique amusante, les jouets scientifiques, etc. »<sup>5</sup>

La raison de ces critiques était qu'aucune mesure fiable des puissances *mécaniques* dépensées et produites n'avait pu être prise par la commission électrotechnique. On accusa Marcel Deprez de ne pas savoir manipuler l'appareil de mesure de l'énergie mécanique absorbée par la génératrice de courant et que cela aurait été la raison officielle pour laquelle il choisit de ne pas faire cette mesure. La raison officielle, donnée par Cornelius Herz, était que Marcel Deprez n'avait pas eu le temps, devant toute l'assemblée qui assistait à l'expérience, d'interpréter les résultats fournis par l'appareil de mesure :

---

<sup>1</sup> Ibid., p130.

<sup>2</sup> Ibid., p130.

<sup>3</sup> Ibid., p130.

<sup>4</sup> Cornelius Herz, « Transport Electrique de la force. Expériences du chemin de fer du Nord », *La Lumière Electrique*, Volume 8, 3 mars 1883, p271 à 283, p271.

<sup>5</sup> Ibid., p271.

« Il lui eût été facile assurément de relever plusieurs diagrammes, mais l'interprétation de ces diagrammes exige la quadrature de courbes de plusieurs mètres de longueur, et cette opération qui absorbe un temps considérable ne saurait être faite au milieu d'un atelier. (...) Le relevé des courbes dynamométriques devant les personnes qui assistaient à cette première expérience n'aurait donc eu d'autre but que de leur donner le plaisir quelque peu puéril de contempler un tracé plus ou moins capricieux dont elles n'auraient pu tirer aucune indication utile. »<sup>1</sup>

Théodose du Moncel, qui connaissait la distinction entre rendement électrique et rendement mécanique pour l'avoir énoncée, affirmait pourtant, lorsqu'il s'agissait des expériences de Marcel Deprez, qu'il n'y avait pas incompatibilité entre rendement mécanique et rendement électrique et que le manque d'informations relatives aux puissances mécaniques absorbées et transmises n'était pas si gênant :

« Nous pensons avoir montré surabondamment que le succès de l'expérience hardie, tentée par M. Marcel Deprez, a pleinement confirmé les calculs et les vues théoriques de cet ingénieur, et que l'incompatibilité que ses adversaires ont voulu établir entre la valeur du rendement électrique et celle du rendement mécanique n'existe pas. »<sup>2</sup>

### *c) Présentation de Marcel Deprez*

Pourtant Marcel Deprez était ingénieur mécanicien de formation. Ancien étudiant externe à l'École des Mines à Paris, il y étudia la mécanique rationnelle, et devint en même temps secrétaire du directeur de l'École, Charles Combes (1801 - 1872), qui travaillait aussi pour la Compagnie de chemin de fer du Nord. Il rencontra ensuite Joseph Bertrand qui le considérait alors comme un « jeune homme sans grade et sans titre, recommandé par son seul mérite »<sup>3</sup>. Ce dernier, dans un article sur les travaux de Marcel Deprez paru dans *La Lumière Electrique* et qui suivait l'article de Cornelius Herz précédemment évoqué, rappela que ses premières expériences portaient sur les machines à vapeur. Il contribua à l'élaboration d'un régulateur de vitesse pour machine à vapeur, à laquelle ont participé les savants Watt, Kepler, Foucault, Fermat. Il travailla également sur les gaz issus de la poudre à canon. Marcel Deprez réalisa

---

<sup>1</sup> Ibid., p271.

<sup>2</sup> Théodose du Moncel, « Le rendement électrique », *La Lumière Electrique*, Volume 7, n°49, 9 décembre 1882, p551 à 557, p557.

<sup>3</sup> Joseph Bertrand, *ibid.*, p198.

aussi une amélioration du chronographe de Schultz, constitué d'électro-aimants, qui servait à mesurer le temps que mettait un projectile à atteindre sa cible. Dans le cadre de ces travaux, Marcel Deprez collabora avec le corps de l'artillerie de marine. A propos du corps de l'artillerie de marine, Joseph Bertrand écrivait :

« Le corps de l'artillerie de marine, attentif aux progrès de la science, exécute, depuis plus de trente ans, les travaux techniques les plus admirés. De laborieux et savants officiers, dignes de leurs chefs, y associent leurs noms à ceux du colonel Sebert et des généraux Frébault et Virgile ; leurs annales, publiées pour notre armée seulement, sont lues dans toute l'Europe et consultées utilement par les représentants de la science pure.

Ce corps d'élite, cependant, est recruté, personne ne l'ignore, parmi les derniers élèves de l'Ecole polytechnique. »<sup>1</sup>

Cet article ayant pour but de faire l'éloge de Marcel Deprez, Joseph Bertrand insista sur le fait que les membres du corps de l'artillerie de marine, bien que derniers de l'Ecole Polytechnique, produisaient des travaux de qualité. Cela n'enlevait donc rien à la gloire de Marcel Deprez d'avoir collaboré avec eux :

« Si j'avais à dire et à discuter les tentatives antérieures aux expériences de MM. Deprez et Sebert, la matière ne manquerait pas. J'ai désiré montrer seulement, de manière à ne laisser aucun doute, que la France possède, sans le savoir assez, un inventeur de premier ordre. »<sup>2</sup>

Tout au long de l'article, Joseph Bertrand s'attacha à vanter les mérites des travaux de Marcel Deprez. L'article commençait d'ailleurs ainsi :

« Il serait curieux de chercher et utile de dire, parmi les cent cinquante-six mille cinquante-quatre projets caressés d'abord avec tant d'espérances, combien ont pu subir l'épreuve de l'expérience et y survivre ; combien, en moindre nombre, ont enrichi leurs inventeurs ; combien enfin, plus glorieux et plus rares, ont mérité pour eux une place dans l'histoire de la science. »<sup>3</sup>

Joseph Bertrand tenta d'éclairer le lecteur sur qui était Marcel Deprez en le comparant à une série de savants maudits qui n'ont pas été reconnus à leur juste valeur, d'abord au « roi

---

<sup>1</sup> Ibid., p197. Le colonel Sebert était, en 1889, directeur du laboratoire central de la marine et membre du jury de l'Exposition universelle de 1889 à Paris.

<sup>2</sup> Ibid., p198.

<sup>3</sup> Ibid., p194.

René », puis à J. – B. Porta, l’inventeur de la chambre obscure et à Robert Hooke (1635 – 1703), le rival de Newton. Ci-dessous la tirade le comparant au roi René :

« Lorsque M. Hase, conservateur des manuscrits à la Bibliothèque nationale, faisait à un curieux de science médiocre les honneurs des richesses confiées à sa garde, il choisissait et ne variait guère. Après avoir montré une tragédie de La Fontaine (inédite, je crois) et interrompu sa lecture au troisième vers, pour s’écrier avec finesse :

Ne forçons pas notre talent,

Nous ne ferions rien avec grâce,

il passait aux albums du bon roi René. René, s’il faut en croire ce philologue érudit, qui savait tout, aimait passionnément les fêtes, les troupes de belles dames richement parées, les cavalcades, les chasses au faucon et, en toutes choses, le faste d’un grand prince. Trop pauvre pour son royaume de Provence pour s’entourer de tant de splendeurs, le bon roi les tournait en peinture. L’album du roi René est la confidence de ses rêves. M. Deprez, comme le roi René, a fait de beaux rêves, que les circonstances souvent n’ont pas permis de réaliser. Malheureusement il écrit peu, les projets restent dans sa tête ; il les dessine sur des feuilles volantes et les rédige avec paresse à ses moments perdus, qui sont rares. »<sup>1</sup>

A la fin de son article, Joseph Bertrand compara Marcel Deprez à Gustave Froment, constructeur d’instruments de mesure et de moteurs déjà évoqué en première partie. Trois traits caractérisaient Gustave Froment selon lui, sa « merveilleuse habileté d[e] l’artiste », l’« étendue de son esprit » et la « solidité de son savoir »<sup>2</sup>, trois qualificatifs qui semblaient pouvoir s’appliquer à Marcel Deprez. Joseph Bertrand reconnaissait quand même que Marcel Deprez ne communiquait pas du tout de la même manière que Gustave Froment ou le roi René :

« Il [Gustave Froment] ne publiait rien, ne communiquait rien aux académies, ne leur demandant ni une récompense, ni l’honneur de pénétrer dans leurs rangs. Il ne se plaignait pas qu’on ignorât son mérite et ses contemporains sont excusables de l’avoir laissé dans la demi-obscurité et dans la solitude qui lui plaisaient.

M. Marcel Deprez, bien différent en cela de Froment, communique toutes ses idées, expose au grand jour tous ses résultats et s’efforce d’être utile à tous ; il admet quiconque le demande à contrôler ses assertions et désire avant tout qu’on en pèse le mérite.

---

<sup>1</sup> Ibid., p205.

<sup>2</sup> Ibid., p207.

Il y aurait injustice à le refuser. »<sup>1</sup>

#### d) Bilan

Dans un article paru en novembre 1882 dans *La Lumière Electrique*<sup>2</sup>, Frank Géraldy critiqua lui aussi la réaction de la communauté des électriciens face aux résultats de l'expérience de transport d'énergie électrique de Marcel Deprez à Munich :

« Nous voyons en effet apparaître déjà quelques symptômes d'une évolution des esprits qui se produit presque toujours lorsqu'une découverte prend corps et arrive à la réalisation. Presque inévitablement le public, une fois bien au courant des principes et des dispositions mécaniques nouvelles, s'aperçoit que les résultats qui l'ont étonné sont obtenus par des moyens dont la clarté le frappe ; il admire d'abord, puis peu à peu s'habitue ; au bout de quelques jours, il trouve la chose toute simple, et après un certain temps, chacun dit naïvement : « Cette affaire, ah ! oui, c'est très bien, mais tout le monde connaissait cela d'avance, il n'y avait qu'à essayer. » »<sup>3</sup>

Il est difficile de savoir à ce stade si cette défense de Marcel Deprez face aux critiques émises par ses collègues sur ses expériences en Allemagne sont justifiées ou pas. Malgré les problèmes de mesure mécanique, la commission allemande était optimiste et estimait que l'expérience de Marcel Deprez était un succès<sup>4</sup>. Dans une lettre adressée personnellement à Marcel Deprez par les membres de la commission chargée d'évaluer son expérience à Munich, ces derniers l'invitaient à venir répéter ses expériences, avec des machines plus solides, tout en garantissant le soutien de l'élite munichoise :

« Nous croyons pouvoir vous assurer que vous trouverez l'appui le plus puissant auprès des administrations de l'Etat et de la ville, auprès du consortium fondé à Munich pour l'encouragement des entreprises électro-techniques, auprès de l'Union polytechnique, et enfin auprès des professeurs et des industriels de notre ville »<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup> Ibid., p207.

<sup>2</sup> Frank Géraldy, « Exposition Internationale d'Electricité de Munich – A Propos de l'Expérience du Transport de la Force », *La Lumière Electrique*, n°43, 28 octobre 1882, p424-425 et n°44, 4 novembre 1882, p448-449.

<sup>3</sup> Ibid., p448.

<sup>4</sup> Théodose du Moncel, « Transport de la force par une ligne télégraphique entre Munich et Miesbach », *La Lumière Electrique*, n°5, 3 février 1883, p129 à 132, p132.

<sup>5</sup> Ibid., p132.

En décembre 1882, pour le récompenser de son expérience, Marcel Deprez reçut la médaille d'or de la *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*. Dix-huit médailles d'or furent décernées au même moment ; celle de Marcel Deprez était listée comme la septième et récompensait l'ensemble de ses travaux relatifs à l'électricité. Une seconde médaille d'or était également liée à l'électricité, elle récompensait les travaux de Gustave Froment que nous venons de mentionner.

## II. Février 1883 – Gare du Nord. Deuxième expérience de Marcel Deprez avec la Compagnie des Chemins de fer du Nord

### 1. Henri Tresca, mécanicien à la rescousse

La même expérience que celle qui eut lieu en Allemagne en 1882 fut reproduite en France quelques mois après sur une distance plus courte, avec le même type d'équipement. Celle-ci fut réalisée sur trois jours, les 11, 15 et 18 février 1883. Un rapport fut publié une fois encore dans *La Lumière Electrique*, cette fois par Cornelius Herz<sup>1</sup>. Dans cette expérience, la génératrice de courant et le moteur électrique étaient placés côte à côte, à La Chapelle. Les machines étaient reliées entre elles par deux fils : un fil court qui faisait la liaison directe entre les deux, et un fil long, de 4mm de diamètre, qui formait une boucle allant de la Chapelle jusqu'au Bourget, puis qui revenait à La Chapelle. La distance entre les deux villes était de 8,5 km :

« Les tensions électriques de plus de 2000 Volts sont déjà considérables en vue des applications, mais elles ont permis de transmettre cette fois un travail de près de quatre chevaux à la distance précédemment indiquée, équivalent à fort peu près à une distance effective de 8,5km entre les deux stations extrêmes. »<sup>2</sup>

Un scientifique anglais, John Hopkinson, membre de la *Société Royale de Londres*, fut en charge d'effectuer les mesures électriques. Cette fois, les mesures mécaniques furent faites par Henri Tresca (1814 – 1885), ingénieur mécanicien, président de la *Société des Ingénieurs Civils*, et non plus par Marcel Deprez lui-même, dans le but, selon Cornelius Herz, de

---

<sup>1</sup> Cornelius Herz, *ibid.*

<sup>2</sup> *Ibid.*, p282.

permettre à Marcel Deprez et à sa personnalité reconnue de s'effacer devant ses résultats. Cornelius Herz écrit que Marcel Deprez était « désireux de donner aux constatations d'ordre mécanique dont son importante expérience allait être l'objet, toute l'authenticité et toute l'impersonnalité (qu'on nous permette cette expression) possible (...). »<sup>1</sup>

Dans le compte-rendu fait par *La Lumière Electrique* sur ces expériences, sorte de dossier spécial, Henri Tresca évoqua les premières expériences de transport d'énergie électrique auxquelles il participa. Les premières furent celle d'Hippolyte Fontaine à l'Exposition de Vienne en 1873, puis celle de Chrétien et Félix à Sermaize, pour lesquelles il rédigea un compte-rendu à l'Académie des Sciences le 26 mai 1879 et qui indiquait que la distance de transport était de 650 m. Dans cette expérience, le moteur électrique était relié à une « charrue ou une machine à battre »<sup>2</sup>. Il participa également aux expériences de Ducommun et Steinlen à l'Exposition internationale d'électricité en 1881 : la distance de transport variait entre 84 m à 560 m. Enfin, Henri Tresca réalisa lui-même des expériences dans ce qui était à l'époque les ateliers des magasins du Louvre, avenue Rapp à Paris. Il les réalisa au moment où il rédigeait sa note sur les expériences de Marcel Deprez aux chemins de fer du Nord ; la distance de transport était de 120 m.

Le 11 février 1883, la puissance mécanique fournie par le moteur électrique, mesurée par un frein relié au moteur, était de 2 chevaux. La puissance mécanique absorbée par la génératrice de courant, mesurée avec un dynamomètre prêté par le CNAM, était de 6 chevaux. Ces 6 chevaux incluaient les pertes par frottements liées à l'insertion de l'instrument de mesure entre la machine à vapeur et la génératrice, d'une valeur de 0.38 chevaux, négligeable<sup>3</sup>. Le rendement mécanique du système, qualifié de « rendement mécanique industriel brut » était donc de 2 chevaux/ 6 chevaux = 33%.

Le 15 février, la vitesse de la génératrice de courant passa de 590 tours/minute à 910 tours/minute. La puissance mécanique fournie à la génératrice par la machine à vapeur passa de 6 à 11 chevaux, et incluait comme précédemment les « frottements des poulies et courroies de

---

<sup>1</sup> Ibid., p272.

<sup>2</sup> Ibid., p276.

<sup>3</sup> Ibid., p272.

la transmission mécanique existant entre le dynamomètre et la génératrice »<sup>1</sup>. La puissance mécanique utile fournie par le moteur électrique était de 4 chevaux. Le rendement mécanique était donc de  $4/11 = 36\%$ . Cette fois-ci la liaison mécanique entre l'instrument de mesure, le dynamomètre, et la génératrice de courant générait des pertes de puissance par frottements de 2 chevaux. Si cette perte liée à la mesure était déduite des 11 chevaux, la puissance réellement absorbée par la génératrice n'était plus de 11 mais de 9 chevaux. Le rendement mécanique, qualifié de « rendement mécanique industriel », était alors égal à  $4/9 = 44\%$ .

Les pertes d'énergie au sein des machines furent plus importantes dans cette deuxième série d'expériences où la vitesse de la génératrice avait été augmentée. Cela était dû, selon Tresca, à l'augmentation de la tension du courant produit par la génératrice, ce qui entraînait une augmentation des étincelles au sein des deux machines, génératrice et moteur.

Dans l'expérience du 18 février 1883, la vitesse moyenne de la génératrice de courant était cette fois de 883 tours/minute et le rendement mécanique industriel atteint la valeur de  $42\%$ <sup>2</sup>.

## *2. Rendement électrique*

Le 11 février, la puissance électrique de la génératrice était de 4,42 chevaux, celle du moteur de 3,12 chevaux et donc le rendement électrique de  $3,12/4,42 = 71\%$ .

Les deux jours suivants, lorsque la vitesse de la génératrice fut quasiment doublée, la puissance électrique de cette dernière était de 6,8 chevaux, celle du moteur de 5,4 chevaux et le rendement électrique du système de transport de  $5,4/6,8 = 79\%$ .

## *3. Débat sur la valeur du rendement entre Joseph Bertrand et Henri Tresca*

La conclusion de Cornelius Herz fut que les théories de Marcel Deprez furent validées par les expériences ; en effet, une augmentation de la vitesse de la génératrice avait dans

---

<sup>1</sup> Ibid., p272.

<sup>2</sup> Ibid., p272.

l'expérience comme dans la théorie pour effet d'augmenter le rendement du système électrique et la puissance utile reçue par le moteur.

Cornelius Herz fit suivre son article du compte-rendu d'Henri Tresca transmis le 19 février 1883 à l'Académie des Sciences. La discussion que ce dernier eut avec Joseph Bertrand fut retranscrite. On y voit que les mesures mécaniques réalisées par Henri Tresca faisaient ombre aux valeurs électriques obtenues. Il était en effet plus impressionné d'annoncer un rendement de 70% qu'un rendement de 40%. C'est pourquoi Joseph Bertrand insista sur le fait qu'au-delà de la valeur du rendement, c'était la quantité de travail utile produite. Il nota que Marcel Deprez était parvenu à produire une puissance variant entre 2,5 et 3 chevaux à une distance de 8.5 km de sa source : peu importait le rendement avec lequel ce transport était fait, la quantité de travail transportée sur cette distance était en soit remarquable. Henri Tresca reconnaissait ce fait, et pourtant affirmait qu'il était également important de connaître le rendement :

« Cependant, dans mon éducation de mécanicien, j'ai cru qu'il y avait un certain intérêt scientifique à savoir si une machine, dans une circonstance déterminée, rendait pour un travail transmis déterminé 30, 40 ou 50%. C'est un point de vue qui, nous, mécaniciens, nous intéresse d'une manière toute particulière. »<sup>1</sup>

Plus loin, Henri Tresca ajouta :

« Dans l'état actuel des choses, c'est déjà un grand résultat que d'avoir le transport à 8500 mètres de distance de 3 chevaux et de 42%. Je suis persuadé que nos confrères ne comptaient sur ce résultat. Maintenant si vous voulez admettre que dans l'avenir on aura 80%, je réponds : Je le désire comme vous, mais dans l'état actuel des choses, je ne vois pas encore le moyen d'y parvenir. »<sup>2</sup>

Joseph Bertrand insistait :

« Théoriquement, on pourrait arriver, en supprimant certains frottements à 100%. On aurait bien tort de triompher, parce que dans ce cas-là le travail transmis serait zéro. On transmet 0 et on obtient 0. Cela fait 100% (Rires).

---

<sup>1</sup> Ibid., p273.

<sup>2</sup> Ibid., p274.

C'est pour cela que l'évaluation d'une machine uniquement par le rendement n'est pas un renseignement suffisant ; ceux qui le donnent et qui le donnent avec exactitude par de grands travaux, rendent un service, ils font bien dire tout de suite que ce n'est pas le dernier, et que les gens qui s'intéressent à ces grandes questions ne sont pas suffisamment renseignés quand on leur dit : on a obtenu hier 33%, aujourd'hui 34. Il faut ajouter pour être complet : on obtiendra peut-être demain 75% et cela vaudra moins que 40. Il n'y a pas de paradoxe, c'est un fait. »<sup>1</sup>

Henri Tresca lui répondit :

« Il serait très désirable que les expériences de la machine de M. Marcel Deprez fussent assez multipliées pour que l'on pût dans une circonstance déterminée savoir quel est le maximum de rendement. Dans l'état actuel des choses, nous ne le savons pas. »<sup>2</sup>

L'échange entre l'électricien Joseph Bertrand et le mécanicien Henri Tresca se termina par une intervention du président de l'Académie des Sciences précisant que Marcel Deprez se proposait de renouveler ses expériences. Le président nomma Joseph Bertrand, Henri Tresca, Cornu, Ferdinand de Lesseps et Charles de Freycinet comme membres de la commission en charge de son évaluation.

### *III. Août 1883. Grenoble – Troisième expérience de Marcel Deprez entre Vizille et Grenoble*

L'expérience de Marcel Deprez fut donc reproduite une troisième fois, le 28 août 1883. Marcel Deprez utilisa pour ses expériences à Grenoble les mêmes machines que celles utilisées pour ses précédentes expériences aux chemins de fer du Nord. Quelques variations quand même par rapport aux deux précédentes : la génératrice et le moteur étaient cette fois physiquement distantes de 14km, reliés par un fil en bronze siliceux de 2 mm de diamètre. Et la génératrice était mise en mouvement, non plus par une machine à vapeur, mais par une turbine hydraulique, installée à Vizille située à 14km de Grenoble. L'objectif était de réaliser l'éclairage de la Halle au centre-ville de Grenoble, d'installer une ligne téléphonique entre les deux villes<sup>3</sup>, et de vérifier une nouvelle fois que le rendement d'un système de transport

---

<sup>1</sup> Ibid., p275.

<sup>2</sup> Ibid., p275.

<sup>3</sup> François Caron et Fabienne Cardot, *ibid.*

d'énergie électrique était indépendant de la résistance du fil de transmission, « à la condition que la résistance de la ligne soit dans un rapport constant avec la somme des résistances des machines »<sup>1</sup>.

Une commission fut nommée par la ville et était composée de quatre ingénieurs civils, de deux ingénieurs des Ponts et Chaussées, d'un ingénieur des mines, d'un ingénieur-inspecteur des lignes télégraphiques, du directeur d'une école professionnelle, d'un préparateur de physique à la Faculté des Sciences, et de Julien Boulanger, capitaine du génie, président de la commission. Comme dans l'expérience précédente, ils effectuèrent deux types de mesures, mécaniques et électriques.

Les tensions obtenues par Marcel Deprez à Grenoble furent un peu plus élevées que dans ses expériences précédentes mais moins élevées quand même que celles obtenues théoriquement par Marcel Deprez dès 1881. Ici elles atteignirent cette fois 2800V aux bornes de la génératrice et 1700V aux bornes du moteur dès les premières mesures électriques, ce qui équivalait à un rendement électrique de 60%. Suite à ces premières mesures le voltmètre grilla et ils mesurèrent donc ensuite la tension à partir de la vitesse des machines puisque les expériences de Marcel Deprez à la gare du Nord avaient confirmé sa théorie selon laquelle lorsque l'intensité du courant était maintenue constante, la vitesse d'une machine, génératrice de courant ou moteur, était proportionnelle à la tension de la machine. La vitesse de la génératrice de courant était de 950 tours/ minute ; au-delà, son commutateur faisait trop d'étincelles.

La puissance mécanique fournie par le moteur était de 5 à 6 chevaux pour une puissance mécanique reçue par la génératrice de 10 chevaux, ce qui équivalait à un rendement mécanique de 50% environ<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Julien Boulanger, « Expériences de M. Marcel Deprez à Grenoble sur le transport et la distribution de la force par l'électricité », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°45, 10 novembre 1883, p322.

<sup>2</sup> Ibid.

### *Bilan de l'expérience*

Lorsque les vitesses des machines augmentaient, le rendement électrique aussi. La théorie de Marcel Deprez fut donc une nouvelle fois vérifiée. Néanmoins il devenait matériellement difficile de dépasser un certain seuil de tension, élément pourtant central dans la théorie de Marcel Deprez qui soutenait que plus les tensions étaient élevées, meilleur était le rendement. Sur ce point, les rapporteurs de la commission soulignaient que l'installation ne pouvait pas encore être évaluée économiquement car elle n'en était qu'au stade expérimental : les machines étaient encore trop fragiles en comparaison de celles qu'il fallait pour une utilisation industrielle. Ajouter à leur coût élevé, ils considéraient qu'il n'était pas encore possible de mettre en exploitation le système de Marcel Deprez dans une ville :

« Dans tous les cas, il y a un côté de la question qu'il est impossible d'étudier actuellement, c'est le côté économique que l'on pourra faire intervenir que quand on possédera des machines et une installation générale se rapprochant plus de la pratique industrielle que ne peuvent le faire les appareils employés aujourd'hui. »<sup>1</sup>

La conclusion de la commission de Grenoble en charge de superviser l'expérience souligna néanmoins les réalisations techniques accomplies et celles qui restaient à faire, ainsi que les enjeux qui y étaient liés :

« En résumé, la Commission estime que les expériences de Grenoble ont donné des résultats assez satisfaisants pour justifier l'intérêt que présenteraient des expériences entreprises dans de plus vastes proportions. La partie théorique semble maintenant définitivement acquise ; les principes établis par M. Marcel Deprez ont été complètement vérifiés, tant par les mesures dynamométriques, que par les mesures électriques. Il y a donc lieu de pénétrer plus avant dans la voie de la pratique, en étendant les essais et en abordant les questions de détail nécessaires à une application industrielle.

Quel que soit l'avenir réservé au transport de la force par l'électricité, les dernières expériences auront certainement fait faire un pas de plus à la question, en vérifiant certains points de théorie encore controversés, et en indiquant des améliorations à apporter aux machines déjà existantes. Ce sera, dans tous les cas, un honneur pour la ville de Grenoble et pour la municipalité, qui a pris l'initiative des expériences, d'avoir fait progresser une question qui intéresse à un si haut point l'industrie. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> Ibid, p336-337.

Joseph Bertrand, qui continuait de prendre la défense de Marcel Deprez, réitéra ses propos sur le fait que le rendement ne devait pas compter autant dans les esprits des ingénieurs électriciens et que ce qui comptait, c'était la quantité de travail que l'on pouvait transporter, non son coût. Il se servit lui aussi de l'exemple de la puissance disponible aux chutes du Niagara pour illustrer son idée :

« Si l'on pouvait transporter à New York les 17 millions de chevaux qu'un mécanicien voit tomber du Niagara, qu'importerait d'en perdre les neuf dixièmes en route ? Que penserait-on d'un savant qui, sachant démontrer que tout choc fait perdre du travail, regretterait la force perdue quand on forge du fer ? »<sup>1</sup>

Paul Bert (1833 – 1886), ancien ministre de l'instruction publique (nov. 1881 – janv. 1882)<sup>2</sup> cité par Cornelius Herz dans son compte-rendu dans *La Lumière Electrique*, ne tarissait pas non plus d'éloges à propos du savant :

« M. Marcel Deprez a complètement triomphé des obstacles qui avaient arrêté ses prédécesseurs, et les forces naturelles qui ne coûtent rien et qui sont aujourd'hui perdues, pourront être utilisées par l'industrie. La force de la chute d'eau sortira de la gorge inaccessible, celle du vent descendra de la colline abrupte, celle de la marée, immense et inutilisée, pourra être saisie et transmise hors de la portée des vagues. C'est l'aurore d'une révolution industrielle.

Aussi voilà un nom, hier encore, presque ignoré du grand public, si haut qu'il fût déjà placé dans l'estime des hommes de science, et qui bientôt sera dans toutes les bouches. L'expérience de Grenoble-Vizille, si admirable qu'elle soit, n'est qu'un essai, un début bien modeste à côté de ce que l'humanité devra aux travaux de Marcel Deprez. »<sup>3</sup>

Cornelius Herz termina son compte-rendu par l'évocation d'une collaboration en préparation entre les frères Rothschild et Marcel Deprez en vue d'une quatrième expérience, à laquelle nous allons plus particulièrement nous intéresser :

« Nous avons dit que le transport de l'énergie par l'électricité allait entrer dans une phase nouvelle ; et nous pouvons annoncer qu'une application d'une grande importance se prépare actuellement. Des traités passés avec la maison de MM. Rothschild frères, assurent le développement et l'exploitation de

---

<sup>1</sup> Joseph Bertrand, *ibid.*, p202.

<sup>2</sup> L'historienne Carole Reynaud-Paligot a démontré que Paul Bert était également un promoteur du racisme républicain. Carole Reynaud-Paligot (2006), *La République raciale*, PUF.

<sup>3</sup> Cornelius Herz, « Transport Electrique de la Force à Grande Distance », *La Lumière Electrique*, volume 10, n°41, 13 octobre 1883, p193.

la belle découverte de M. Marcel Deprez dans le monde entier, et cette solution est le digne couronnement des recherches auxquelles M. Marcel Deprez a consacré son génie. »<sup>1</sup>

#### *IV. 1885. Creil – Quatrième expérience de Marcel Deprez à Creil*

Dans l'extrait qui précède, Cornelius Herz faisait l'annonce des dernières expériences publiques de Marcel Deprez, qui eurent lieu en 1886 entre Creil et La Chapelle, sur une distance de 56 km. Une commission nommée par Edmond de Rothschild (1845 – 1934) et composée en partie de membres de l'Académie des Sciences rédigea le compte-rendu des expériences de Marcel Deprez à Creil, qui fut présenté par Maurice Lévy le 2 août 1886. Charles de Freycinet (1828 – 1923), membre de l'Académie des Sciences, était le président d'honneur de la commission. La présidence effective était tenue par Joseph Bertrand. Les autres membres de cette commission étaient Becquerel, Cornu, Collignon, Laussedat, Maurice, A. Sartiaux et Léon Lévy, secrétaire de la commission.

L'objectif initial de Marcel Deprez était de produire 200 chevaux à Creil et de les transporter jusqu'à un moteur électrique à Paris avec un rendement mécanique de 50%. Dans un premier temps, la génératrice et le moteur étaient tous installés à Creil, séparés par un câble simulant la distance entre les deux villes. Le rendement mécanique obtenu fut de 50%. Ensuite, le moteur fut déplacé à La Chapelle et les génératrices laissées à Creil, séparés par un fil en bronze siliceux de 5mm de diamètre<sup>2</sup>.

Selon Marcel Deprez et la commission de l'Académie des Sciences, l'expérience fut perturbée par un contact entre la ligne de transport, mal isolée, et des fils télégraphiques en usage.

D'un point de vue mécanique, la commission évalua qu'à Creil, la puissance mécanique absorbée par la génératrice variait entre 67 et 116 chevaux. A la Chapelle, entre 27 et 52 chevaux furent produits par le moteur. Le rendement mécanique varia donc entre 40 et 45%. La commission trouva qu'il augmentait avec le nombre de chevaux transportés.

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> Ph. Delahaye, « Transmission de la force électrique entre Paris et Creil », *Revue Industrielle*, 26 août 1886, p350.

D'un point de vue électrique, à la dernière minute, Marcel Deprez décida de modifier la dimension d'un élément de la génératrice, son anneau, qui avait été initialement construit par l'entreprise Bréguet. Cela eut pour effet de réduire sa vitesse, la machine ne tournait plus qu'à 200 tours/minute. On trouva qu'elle avait un champ magnétique interne encore plus faible que la plus ancienne des dynamos Gramme. Cependant la tension du courant fourni monta jusqu'à 6300 V, pour une tension aux bornes du moteur, modèle Gramme original, de 5000V, soit un rendement électrique de 79%.

### 3. Intégration industrielle du système de Marcel Deprez

A l'issue de cette expérience, la communauté scientifique s'intéressa non plus au rendement, satisfaisant, mais au prix de revient du système expérimenté, en vue de son intégration dans l'industrie. Le chiffre fut donné par Maurice Lévy dans sa note à l'Académie des Sciences datée du 2 août 1886. Le prix du matériel électrique s'élevait, selon la commission chargée d'évaluer les expériences de Marcel Deprez, à 124 000 francs, avec 50 000 francs pour la génératrice, 30 000 francs pour le moteur et 44 000 francs pour le fil<sup>1</sup>. Au total l'expérience réalisée à Creil aurait coûté 400 000 francs. Cependant, selon les rédacteurs de la *Revue Industrielle*, dirigée par l'industriel Hippolyte Fontaine, elle aurait coûté trois à quatre fois plus<sup>2</sup>. Ces derniers considéraient que le compte-rendu de l'Académie des Sciences était un peu trop enthousiaste et que ce que Marcel Deprez avait réalisé n'était en fait rien d'autre qu'une expérience de laboratoire. De leur point de vue, l'objectif de ces expériences ne pouvait de toute manière pas être de fournir des preuves de l'utilisation industrielle du système puisque ces preuves existaient déjà. Pour se justifier, la revue avançait le chiffre de centaines de systèmes de transport de force motrice sous forme d'électricité déjà installés avec succès dans le monde. De plus, le fait que la note de Maurice Lévy ne fut retranscrite dans *La Lumière Electrique* que six mois après les expériences<sup>3</sup> leur paraissait très suspect :

---

<sup>1</sup> Un fil en bronze siliceux recouvert de plomb. Source : « Chronique », *Revue Industrielle*, 12 août 1886, p328 et

« Transmission de la force électrique entre Paris et Creil », *Revue Industrielle*, 26 août 1886, p349-350.

<sup>2</sup> *Revue Industrielle*, 1886, p337 et p468.

<sup>3</sup> « Rapport sur les expériences de M. Marcel Deprez relatives au transport de la force entre Creil et Paris », *La Lumière Electrique*, Volume 22, n°52, 25 décembre 1886, p577 à 592.

« Un des résultats les plus surprenants des dernières expériences de M. Marcel Deprez pour le transport électrique de la force entre Paris et Creil, a été de réduire au silence le journal « La lumière électrique » qui, jusqu'alors, s'était complaisamment prêté à la glorification de son collaborateur académicien. Ce changement d'attitude a de quoi surprendre le public qui n'est pas initié aux mystères des syndicats financiers. L'accord serait, dit-on, loin de régner entre les promoteurs de l'entreprise, et l'on parle même d'un gros procès, de demande d'indemnité ou de dommages-intérêts, qui se chiffre par millions.

On ne peut traiter à moins, lorsqu'on s'adresse à la maison Rothschild ; mais il y a loin de la coupe aux lèvres, et nous serions fort curieux de savoir sur quel fondement peuvent bien reposer de pareilles prétentions. Il est permis de croire, dans le monde de la finance, que M. Marcel Deprez a fait une grande invention : ces erreurs sont communes, même chez les premiers banquiers du monde. Au point de vue industriel, nous en sommes encore réduits à chercher quelle peut être la conclusion pratique de l'expérience de Creil.

On compte déjà au moins une centaine d'applications du transport électrique de la force, tant en Europe qu'en Amérique et même en Océanie. On n'a pas attendu M. Marcel Deprez pour les faire, et on se passera d'autant mieux de ses idées que la distance n'a le plus souvent qu'un rôle secondaire dans les installations. Il suffirait de citer en France l'exemple des Magasins généraux pour être fixé à cet égard.

Il ne convient donc pas de vouloir tirer des expériences de Creil plus qu'elles ne peuvent donner : entreprises à un point de vue scientifique et désintéressée (on l'a suffisamment dit et redit), elles ont contribué à faire admettre certaines personnes dans certaines Académies, ou dans les rangs les plus élevés de la Légion d'honneur. Le résultat est suffisant et il ne faudrait pas qu'il fût gâté par des questions mercantiles qui nous enlèveraient le reste de nos illusions. »<sup>1</sup>

### *a) Critique des expériences par Gustave Cabanellas*

#### *1. Nouvelle valeur du rendement électrique*

Gustave Cabanellas est celui qui s'opposa aux idées et aux expériences de Marcel Deprez de la manière la plus virulente de toutes. Dans chaque principe énoncé par Gustave Cabanellas, il y avait une opposition explicite avec ceux énoncés en même temps par Marcel Deprez. Pour lui, le travail de Marcel Deprez était intéressant uniquement pour toutes ses erreurs

---

<sup>1</sup> Ph. Delahaye, « Chronique », *Revue Industrielle*, 30 septembre 1886, p398.

commises, qui permettaient ainsi à la communauté électrique de montrer la voie à ne pas suivre. Là seulement résidait l'intérêt scientifique des travaux de Marcel Deprez. Il regrettait quand même tout le temps que cela prenait.

L'une des points reprochés par Gustave Cabanellas à Marcel Deprez était de supposer qu'il y avait proportionnalité entre tension et vitesse d'une machine. Selon lui, ce résultat était faux car même si les deux machines étaient traversées par le même courant, le magnétisme en leur sein n'était pas le même, ce qui venait fausser le lien de proportionnalité supposé par Marcel Deprez. Cette erreur de calcul l'amena à surévaluer les rendements électriques lors de ses expériences.

De plus, Gustave Cabanellas lui reprochait de continuer à utiliser la formule de rendement électrique «  $e/E$  », ou rapport des tensions, qu'il considérait d'ailleurs être le premier à avoir utilisée en France<sup>1</sup>. Il arrêta de s'en servir car il trouvait qu'elle négligeait certaines pertes d'énergie. Surtout, elle n'était pas assez précise car ne prenait en compte qu'implicitement la distance de transport. La formule du rendement qu'il utilisait était le produit du rendement de la génératrice au départ du courant, par le rendement de la ligne de transport, par le rendement du moteur électrique à l'arrivée.

## *2. Diatribe de Gustave Cabanellas contre Marcel Deprez*

Au-delà de ces points techniques, Gustave Cabanellas semblait reprocher à une partie de la communauté scientifique l'attention soutenue portée à Marcel Deprez, et à la manière dont ses travaux étaient encensés sans qu'aucun regard critique ne puisse trouver sa place sans être fortement discrédité.

Gustave Cabanellas nota que cet intérêt était récent et que jusqu'au début des années 1880, la question du transport et de la distribution de l'énergie électrique était peu étudiée. Dans une présentation faite devant la *Société Internationale des Electriciens*, il disait : « Je ne puis oublier que, jusqu'à ces dernières années, le Transport et la Distribution électriques de l'Énergie n'avaient

---

<sup>1</sup> « Rendement économique des moteurs électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 2, n°8, 15 avril 1880, p159-160.

guère rencontré que l'indifférence ou le dédain. »<sup>1</sup> Les choses changèrent petit à petit : « Enfin, sans aucune révolution dans le fond, l'opinion publique, excitée sans doute par la presse scientifique et quotidienne, s'était brusquement emparée de la question, avec une telle ardeur que toute sa faveur était aux affirmations les plus entachées de merveilleux, aux promesses les plus aventurées. »<sup>2</sup>

Le terme « merveilleux », qui faisait sans doute référence aux travaux de Marcel Deprez, revint à plusieurs reprises dans sa présentation, toujours avec une teinte d'ironie. Plus loin il disait, toujours sans mentionner explicitement Marcel Deprez : « Et d'abord, pourquoi l'Electricité seule nous en donne-t-elle l'espoir ; est-elle donc en dehors des principes généraux qui régissent tous les autres phénomènes, comme on a essayé sérieusement de le prouver ? Voici venir les sacrifices inutiles et nuisibles au goût du merveilleux »<sup>3</sup>.

Le terme « sérieusement » apparaît ensuite ; comme le terme « merveilleux », il sera repris lorsque la mention de Marcel Deprez sera faite un peu plus loin, après avoir donné un résumé des expériences de transport d'énergie électrique réalisées par Marcel Deprez :

« Nous sommes maintenant en état d'apprécier le moyen sérieusement proposé et soutenu par M. Marcel Deprez, jusqu'à Munich, pour transporter, sans plus de perte, une quantité fixe d'Energie à des distances de plus en plus grandes ; je laisse toute la saveur de merveilleux : (...). »<sup>4</sup>

Gustave Cabanellas en vint ensuite à l'affirmation de Marcel Deprez concernant l'indépendance du rendement et de la distance de transport ; il qualifia ce résultat à nouveau de « merveilleux » :

« *Donc le rendement est indépendant de la distance !* Peut-être avez-vous déjà remarqué les deux pétitions de principe qu'il faut laisser passer pour accueillir favorablement l'affirmation d'un résultat aussi merveilleux (...) »<sup>5</sup>.

Comme nous l'avons vu, Marcel Deprez négligeait l'effet de la distance, sous certaines conditions. Ce principe fut jugé tout à fait inacceptable par Gustave Cabanellas. Selon ce

---

<sup>1</sup> Gustave Cabanellas, « Le transport à grande distance par l'électricité en vue de distribuer automatiquement l'énergie sous ses différentes formes : chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique ; par M. G. Cabanellas », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1885, p258 à 281, p259.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> Ibid.

<sup>4</sup> Ibid.

<sup>5</sup> Ibid., p267.

dernier, quel que soit le mode de transport et ce que l'on transporte, la distance coûte quelque chose et le rendement d'un système de transport d'énergie électrique en dépendait : « (...) Laissant de côté les mérites ou les imperfections des appareils transformateurs d'énergie du départ et de l'arrivée, les supposant même parfaits, le rendement n'en est pas moins tout à fait fonction de la distance. »<sup>1</sup>

Comme Marcel Deprez, il pensait qu'il était néanmoins possible d'atténuer les pertes d'énergie liées à la distance par une augmentation de la quantité d'énergie produite au départ, c'est-à-dire en augmentant la tension. Pour Gustave Cabanellas, distance et quantité d'énergie au départ étaient inversement proportionnelles :

« Dans tout Transport, nous considérerons deux coordonnées : la distance et la grandeur d'Energie dont on dispose au point de départ. (...) »

Voici la loi :

1° La *Distance* d'un Transport est toujours un élément efficacement nuisible ; une plus grande distance, à même Energie disponible au départ, affaiblit forcément l'utilisation spécifique des matériaux et le rendement.

2° La *Grandeur*, l'importance de l'Energie à mettre en œuvre au point de départ, est toujours un élément efficacement avantageux ; à une même distance, une plus grande Energie disponible augmente forcément l'utilisation spécifique des matériaux et le rendement.

La troisième proposition n'est que le scolie des deux premières.

3° Les plus grandes distances de Transport admettent les meilleures utilisations spécifiques et les meilleurs rendements, pourvu que la grandeur d'Energie disponible au départ ait une valeur assez considérable. (...) »<sup>2</sup>

Si Marcel Deprez mit tant l'accent dans ses discours sur le rendement indépendant de la distance, sans toujours préciser clairement que cela était possible sous conditions, c'était peut-être simplement avec l'idée de formuler une sorte de slogan, le but étant de marquer les esprits et d'affirmer que le temps où la distance était une contrainte était révolu. De plus, la

---

<sup>1</sup> Gustave Cabanellas, « Mémoire sur les principes théoriques et conditions techniques de l'application de l'électricité au transport et à la distribution de l'énergie sous les principales formes chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique », *Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils*, Volume 47, 1887, 1<sup>er</sup> semestre, p38-39.

<sup>2</sup> Gustave Cabanellas, « Le transport à grande distance par l'électricité en vue de distribuer automatiquement l'énergie sous ses différentes formes : chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique ; par M. G. Cabanellas », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1885, p271.

distance était imposée par le choix de l'installation des centrales hors des villes, elle était donc moins maîtrisable par le savant, qui l'excluait de ses calculs. Elle avait pourtant bien un rôle important à jouer dans le calcul de l'efficacité d'un système électrique de transport de force à distance, comme nous le verrons avec le prix du cuivre et le scandale financier qui entourera son exploitation.

Toujours est-il que la théorie de Marcel Deprez selon laquelle la distance n'affecte pas l'économie du transport a traversé l'Océan Atlantique et était connue de l'ingénieur nord-américain Thomas C. Martin, qui la citait et l'associait au savant<sup>1</sup>. Thomas C. Martin ne niait pas cette théorie avec la même force que Gustave Cabanellas en France, tout en notant que les expériences de Marcel Deprez étaient loin d'être satisfaisantes.

La critique de Gustave Cabanellas se porta ensuite sur la dimension des machines. L'adjectif « merveilleux » était toujours utilisé : « C'est le moment de vous dire un mot des grandes machines de l'avenir, dont j'ai toujours été partisan, elles me paraissent indiquées dans les grandes exploitations ; je crois, avec tous les mécaniciens, qu'elles doivent apporter des avantages d'unité mécanique et d'économie superficielle ; mais ces avantages naturels n'ont pas paru suffisants à quelques auteurs, et de nouveau le merveilleux a fait son apparition ; il a été reçu toujours avec la même faveur, quand M. Deprez, en France, et notre collègue distingué, M. le professeur Thompson, en Angleterre, en Angleterre, ont voulu prouver que, si l'on multiplie, dans une même proportion quelconque, toutes les dimensions d'une dynamo, on obtient une nouvelle machine dont le pouvoir est plus grand, dans cette proportion élevée à la cinquième de puissance ! Ai-je besoin de dire qu'il n'en est rien ? »<sup>2</sup>

A propos des machines de grande dimension, une démonstration expérimentale de la fausseté de la loi établie par Marcel Deprez selon laquelle multiplier la taille d'une machine par K augmentait sa puissance par  $K^5$  fut donnée à Creil avec les machines qu'il utilisa, défectueuses. Elles étaient de grande dimension mais d'après Gustave Cabanellas, des

---

<sup>1</sup> Thomas Commerford Martin, *ibid.*

<sup>2</sup> Gustave Cabanellas, « Le transport à grande distance par l'électricité en vue de distribuer automatiquement l'énergie sous ses différentes formes : chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique ; par M. G. Cabanellas », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1885, p258 à 281, p273-274.

machines Gramme déjà existantes, ne nécessitant aucune amélioration, aurait pu fournir au moins le même travail<sup>1</sup>.

Enfin, Gustave Cabanellas ne voyait aucun avantage à la solution consistant à utiliser du fil fin dans les machines pour qu'elles puissent produire des courants de haute tension. Selon lui, cela augmentait « le prix de main d'œuvre », la « difficulté de construction » et diminuait « la solidité des anneaux, leur rendement et leur puissance »<sup>2</sup>. Ceci était à l'opposé de la théorie de Marcel Deprez selon laquelle diminuer l'épaisseur du fil à l'intérieur d'une machine permettait d'augmenter sa puissance et ainsi de se libérer de l'influence de la distance pour calculer le rendement d'un transport d'électricité. De plus ce dernier oubliait, selon Gustave Cabanellas, qu'affiner le fil de la machine réduisait la quantité de matière et donc réduisait l'intensité du champ magnétique en son sein. Il prouva par le calcul dès 1879 que les câbles fins à l'intérieur des machines n'étaient pas nécessairement le choix le plus économique. Il prenait en considération la variation du champ magnétique à l'intérieur des machines, qui pouvait considérablement diminuer le rendement des machines et par suite celui du système de transport d'électricité. Pour appuyer son propos, il s'aidait d'une analogie avec les travaux de Frédéric Le Play (1806 – 1882) :

« Leplay, après avoir beaucoup étudié les peuples heureux ou misérables, en décadence ou en progrès, en arrive à affirmer que la clef de tous les effets subsidiaires est l'état moral des peuples, leur degré dans le vice ou la vertu.

La méthode analogue que j'ai appliquée à l'étude des dynamos m'a conduit à des conclusions analogues, le point capital réside dans l'état du développement de puissance de champ magnétique ; l'intensité magnétique est l'âme de la dynamo, là réside la force ou la faiblesse de sa constitution. »<sup>3</sup>

Enfin, bien qu'en faveur des courants de haute tension comme Marcel Deprez, il ne pensait pas qu'il était nécessaire de les confiner dans une seule machine mais, un peu comme Maurice Lévy, de les répartir dans plusieurs :

---

<sup>1</sup> Lettre de M. Gustave Cabanellas à M. Drumont, 18 novembre 1886, Paris : G. Masson, p7.

<sup>2</sup> Ibid., p5.

<sup>3</sup> Gustave Cabanellas, « Mémoire sur les principes théoriques et conditions techniques de l'application de l'électricité au transport et à la distribution de l'énergie sous les principales formes chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique », *Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils*, Volume 47, 1887, 1<sup>er</sup> semestre, p57.

« L'expérience n'a pas condamné les hautes tensions, ni sur la ligne, ni dans les machines, elle n'a condamné que la concentration de grandes différences de potentiel par volume restreint d'enroulement ; il est logique de poursuivre l'emploi de différences de potentiels modérés dans ces volumes, avec de très hauts potentiels absolus. »<sup>1</sup>

La solution privilégiée par Gustave Cabanellas était la suivante :

« (...) On peut réaliser les plus hauts potentiels en n'employant partout que de grosses sections de fil dans les dynamos, ce qui permet de les construire robustes, à des prix modérés, à bons rendements de Matière et d'Énergie. »<sup>2</sup>

#### *a) Robinet électrique de Gustave Cabanellas*

Dès 1881, Gustave Cabanellas proposa un système de transport et de distribution d'électricité en courant continu conforme à ces principes. Il en fit la présentation devant le *Congrès International d'Electricité* organisé à Paris en 1881. La citation ci-dessous présente ses attentes concernant la réception de sa communication auprès ses collègues électriciens ; elle donne aussi une petite idée de son style de communication, que ces mêmes collègues lui reprochèrent beaucoup par la suite :

« J'espère être *trop clair*, selon la *fine expression* d'un savant bienveillant que vous appréciez tous, qui est présent à cette séance (je ne le nomme pas, car toute manifestation publique est un effroi pour sa modestie), telle a été sa critique après examen de mon mémoire ; il dit qu'un auteur a complètement traité une question, lorsqu'il l'a élucidée jusqu'à la *clarté de l'ingratitude*, degré qui est atteint quand, à la suite des travaux de cet auteur, *chacun ayant tout à fait et définitivement compris*, certaines personnes aiment à se prouver et à prouver aux autres qu'il en a toujours été ainsi. Pour moi, je souhaite que cette prophétie se réalise, car ce que je poursuis, c'est seulement la réussite de l'idée, c'est le fait de sa réalisation concrète. »<sup>3</sup>

A la même période, il présenta devant l'*Académie des Sciences*, par l'intermédiaire du savant Cornu, le résultat selon lequel le couple d'une machine électrique était proportionnel à

---

<sup>1</sup> Gustave Cabanellas, « Le transport à grande distance par l'électricité en vue de distribuer automatiquement l'énergie sous ses différentes formes : chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique ; par M. G. Cabanellas », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1885, p258 à 281, p275.

<sup>2</sup> *Lettre de M. Gustave Cabanellas à M. Drumont*, 18 novembre 1886, Paris : G. Masson, p5.

<sup>3</sup> Ministère des Postes et Télégraphes, « Annexe III – Communication de M. Gustave Cabanellas », *Congrès international des électriciens. Comptes-rendus des travaux*, 1881, Paris : G. Masson, p124.

l'intensité du courant qui y circule. Peu de temps après, Marcel Deprez présenta le même résultat devant la même *Académie des Sciences*, par l'intermédiaire de Joseph Bertrand. Gustave Cabanellas signala l'antériorité de ses travaux à Joseph Bertrand, qui en prit note. Toujours est-il que ce principe observé par Gustave Cabanellas lui permit de définir son transformateur, ou comme il l'appelait son « robinet électrique », élément au cœur de sa solution originale de transport de courant continu à grande distance. Il permettait de réguler la quantité de courant distribuée. En effet, une fois transporté sous forme de hautes tensions, le courant devait ensuite pouvoir être utilisable par des appareils électriques utiles aux abonnés et fonctionnant sous de plus faibles tensions. Ce qui imposa l'emploi de machines capables de transformer un courant électrique de haute tension en un courant de plus faible tension. Ces appareils sont appelés transformateurs électriques. Leur rôle, imposé par le choix de produire du courant de manière centralisée, est simplement expliqué ici par Emile Desbeaux (1845 – 1903) :

« Dans les applications de l'Energie électrique, des motifs d'économie conduisent à transporter cette Energie sous forme de courants de faible Intensité et de haute Tension.

Il est alors nécessaire de ramener cette Energie à une tension convenable à l'endroit où elle doit être consommée.

C'est là le rôle du Transformateur. »<sup>1</sup>

Chaque transformateur de Gustave Cabanellas était constitué de « deux dynamos montées sur un même axe »<sup>2</sup>. L'idée lui vint suite à une expérience réalisée à Cherbourg en 1870 sur la modification de l'allure des machines électriques. Son robinet devait permettre de modifier le débit du courant électrique et de l'adapter à la consommation, en analogie avec un robinet classique :

« M. Cabanellas a donné le nom de *robinet électrique* à l'ensemble des deux machines ; par analogie avec les robinets hydrauliques, en effet, en considérant un courant primaire constant, M. Cabanellas trouve que l'on peut construire des Robinets électriques, fournissant un courant secondaire également

---

<sup>1</sup> Emile Desbeaux (1891), *Physique Populaire*, par Emile Desbeaux, Editions Flammarion.

<sup>2</sup> Maurice Leblanc, « Etude sur la Distribution de l'Energie par l'Electricité », *La Lumière Electrique*, n° 29, 20 juillet 1889, p102.

constant d'une intensité que l'on peut faire varier à volonté par construction, et remplissant, par conséquent le même rôle que les robinets hydrauliques, branchés sur une conduite mère. »<sup>1</sup>

Une autre différence avec la solution de Marcel Deprez est que dans la solution de Gustave Cabanellas, pour produire de l'électricité, plusieurs dynamos de taille petite ou moyenne étaient utilisées ; reliées en série, la tension du courant que chacune produisait s'additionnait. Avec ses robinets électriques, il obtenait un système dont on pouvait augmenter ou diminuer l'énergie fournie en ajoutant ou supprimant des machines à la série déjà en place. Lorsqu'il les présenta devant la communauté électrique, il avait conscience que ses travaux avaient abouti à quelque chose d'important, et c'est sans fausse modestie qu'il annonçait :

« Messieurs, je vais avoir l'honneur de poser et de prouver les principes qui dominent l'ensemble du problème du transport et de la distribution de l'Energie par voie électrique et leur organisation automatique rationnelle.

Je pense que lorsque j'aurai terminé la présente communication, que je crois très importante et pour laquelle je ne demande qu'une attention un peu soutenue, j'aurai fait partager l'opinion, qui peut paraître hardie de prime abord, que cette question du transport et de la distribution de l'Energie sous toutes formes, tout nombre, toute qualité, est mûre et s'imposera nécessairement dans un avenir prochain. »<sup>2</sup>

#### *b) Adaptation de la solution du robinet électrique par Marcel Deprez*

Dans sa proposition initiale, Gustave Cabanellas suggéra d'installer les robinets électriques chez les abonnés.

Marcel Deprez reprit la solution de robinet électrique de Gustave Cabanellas et tenta d'en contourner les inconvénients. Dans le système qu'il proposait, les transformateurs étaient du même type que ceux de Gustave Cabanellas. Il proposa que le courant électrique soit produit dans des centrales et que les transformateurs soient regroupés dans des sous-stations desservant un quartier<sup>3</sup>. Comme Maurice Leblanc l'explique :

---

<sup>1</sup> W. Rechniewski, « Les transformateurs à courants continus », *La Lumière Electrique*, Volume 26, n°48, 26 novembre 1887, p416.

<sup>2</sup> Ministère des Postes et Télégraphes, *ibid.*, p123.

<sup>3</sup> Maurice Leblanc, *ibid.*

« Le système de M. Marcel Deprez revient à installer dans une ville une série d'usines productrices d'électricité desservant chacune les quartiers environnants. Ces usines, au lieu d'être actionnées par des machines à vapeur, le sont par des dynamos réceptrices de grande puissance, recevant l'électricité envoyée par une usine principale, située là où l'on peut se procurer la force motrice nécessaire dans les meilleures conditions.

Ce système donne une solution générale du problème, l'emploi de transformateurs puissants permet d'atteindre un rendement de transformation élevé qui peut être facilement de 80%, et l'usage de hautes tensions et d'appareils en mouvement n'offre aucun inconvénient puisque ce sont des ouvriers spéciaux qui sont chargés de les manier.

Il a le défaut d'employer des postes spéciaux de distribution, d'entraîner, par suite, des frais supplémentaires de loyer et de personnel, et d'augmenter beaucoup le développement du réseau distributeur à gros fils.

Cela n'a pas grande importance dans une ville comme Paris où le supplément de frais généraux sera réparti sur une énorme consommation, et où la valeur du cuivre n'entrera que pour une faible part dans le prix d'établissement des conduites souterraines. Mais il n'en serait pas de même si les points de consommation étaient éloignés les uns des autres, n'ayant qu'une faible importance chacun et si l'on pouvait employer des conduites aériennes.

C'est le cas qui se rencontrera le plus souvent dans les pays montagneux où la fréquence des chutes d'eau inutilisées paraît rendre particulièrement avantageux l'emploi de l'électricité pour transporter et distribuer l'énergie. Alors ce système serait trop coûteux. »<sup>1</sup>

Cette solution de Marcel Deprez était la même que celle proposée par Thomas Edison dès 1880. Finalement, Gustave Cabanellas pensait lui aussi qu'il valait mieux installer le robinet électrique dans une sous-station, soutenant l'argument qu'un abonné n'avait pas le même souci d'utilisation optimale de son matériel qu'un gestionnaire de centrale.

### *c) Critique des systèmes Edison et Thomson par Gustave Cabanellas*

Gustave Cabanellas n'était pas seulement critique des travaux de Marcel Deprez. Lors du Congrès international des électriciens en 1881 à Paris, il se livra à une critique du système de distribution proposé par Thomas Edison<sup>2</sup>. Il réalisa des calculs sur ce système « tel qu'il

---

<sup>1</sup> Ibid., p103.

<sup>2</sup> Ministère des Postes et Télégraphes, *ibid.*, p134.

arrivait d'Amérique »<sup>1</sup> qui l'amènèrent à revoir à la baisse les prévisions d'Edison sur son caractère économique.

### 1. *Solution de Thomas Edison et Sir William Thomson*

En 1893, devant les membres de la *National Electric Light Association*, Charles Bradley rappela que les premiers systèmes de distribution en série étaient dus à Thomas Edison en 1880 et Sir William Thomson en 1883. Selon lui, ces installations avaient été faites à une période où les très hautes tensions n'étaient pas encore d'actualité :

« We can get very high voltages by a battery of machines placed in series for the generator and motor stations. The placing of machines in series for power transmission was proposed by Mr. Edison in 1880 and Professor Thomson in 1883. Each contributed some essential improvement, but it is evident that the enormously high voltages now contemplated were not even thought of. »<sup>2</sup>

Dans le système de Thomas Edison, l'électricité était produite par une ou plusieurs dynamos reliées en série, qui constituaient la centrale, reliée à des stations secondaires elles-mêmes reliées aux différents quartiers. Les stations secondaires, qui desservaient les quartiers de la ville, étaient elles aussi reliées en série. La centrale pouvait être éloignée des quartiers à éclairer. A chaque station secondaire, il était possible de régler la valeur de la tension avec une résistance réglable qui servait à maintenir la tension constante : si une lampe s'éteignait, on modifiait la valeur de cette résistance pour que la tension soit maintenue.

### 2. *Succès de Thomas Edison en France*

Thomas Edison présenta son système complet de production et d'éclairage électriques en 1881 à l'Exposition internationale d'électricité à Paris, puis l'inaugura en septembre 1882 à New York. En février de la même année, il avait déjà créé à Ivry trois sociétés chargées de gérer ses affaires sur le continent européen (construction de matériel électrique,

---

<sup>1</sup> Gustave Cabanellas, « Mémoire sur les principes théoriques et conditions techniques de l'application de l'électricité au transport et à la distribution de l'énergie sous les principales formes chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique », *Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils*, Volume 47, 1887, 1<sup>er</sup> semestre, p127.

<sup>2</sup> Charles S. Bradley, « Long distance transmission of power », *Proceedings of the National Electric Light Association*, Février – Mars 1893, p142 à 150, p147.

établissement de centrales et d'installations individuelles). Les premières centrales électriques françaises furent construites dans les années 1880 par l'une de ces entreprises, la *Compagnie Continentale Edison*.

La *Compagnie Continentale Edison*, installée à Ivry sur Seine, avait pour mission l'installation de centrales en Europe. Elle commença son exploitation le 17 février 1882, en même temps que le *Société Electrique Edison*, dont la mission était la vente de matériel Edison et la vente d'installations isolées. Ce matériel, dynamos plus lampes, était issu d'une usine située dans la même ville. On pourrait croire que l'objectif de la *Société Electrique Edison* entraînait en contradiction avec celui de la *Compagnie Continentale Edison*. Hors ce qui pouvait commencer avec la vente d'une installation isolée pouvait se conclure par l'installation d'une centrale dans le quartier, comme dans le cas de l'éclairage du *Bon Marché*, premier gros client de la *Société Electrique Edison*. Ce contrat amena ensuite la *Compagnie Continentale Edison* à construire une centrale pour fournir en électricité les immeubles autour du *Bon Marché*.

Ainsi les filiales d'Edison pouvaient toutes être profitables. On lit dans le *Rapport présenté par le Conseil d'administration à l'Assemblée générale des Actionnaires de la Société Electrique Edison sur l'exercice 1882* :

« Il n'est pas douteux que les installations isolées ne servent ainsi, dans beaucoup de circonstances, d'amorces aux Stations centrales. »<sup>1</sup>

Au total, fin 1882, la *Société Electrique Edison* et la *Compagnie Continentale Edison* établirent en Europe 110 installations avec 158 machines dynamo-électriques pouvant alimenter 20000 lampes. Quelques années après, la *Société Electrique Edison* fut intégrée dans la *Compagnie Continentale Edison* qui reprit l'activité d'installations isolées, ce qui indique peut-être que la priorité d'Edison était bien l'installation de centrales et que les installations de plus petite taille n'était qu'une première étape.

---

<sup>1</sup> Rapport présenté par le Conseil d'administration à l'Assemblée générale des Actionnaires de la Société Electrique Edison sur l'exercice 1882, p2.

### 3. Thomas Edison aux Expositions universelles

Les années 1882 et 1883 étaient qualifiées par les administrateurs des entreprises Edison françaises de « période d'organisation » qui coûta assez cher. Certaines des installations réalisées par Edison ne devinrent définitives qu'après une période d'essai visant à attirer et rassurer la clientèle, qui était aux frais de la compagnie. La compagnie dépensa des fonds en expériences dans le théâtre du Parc, à Bruxelles et au Conseil municipal de Paris. La participation aux Expositions universelles était une autre cause de dépenses importantes. Elles étaient l'occasion de présenter les dernières innovations scientifiques et industrielles à un public large. Le système des récompenses associé était une sorte de label permettant de donner de la valeur ajoutée aux produits exposés<sup>1</sup>.

En 1881 à Paris, en plus de son système d'éclairage à incandescence, les autres appareils électriques présentés dans la salle d'exposition de Thomas Edison étaient un phonographe, des éléments de câblage électrique, un système photométrique, des appareils de réglage et de mesurer de l'intensité du courant, un compteur, un télégraphe imprimeur, une électrotrieuse, des échantillons de bambou, éléments naturels permettant la fabrication des lampes à incandescence et une plume électrique, mise en mouvement par un moteur électrique. *La Lumière Electrique* rapporte que le phonographe fut utilisé de manière provocatrice pour jouer un chant populaire devant le dernier roi d'Hawaii, Kalakaua (1836 – 1891), ainsi que l'hymne national états-unien devant le prince de Galles :

« (...) Dans la salle d'entrée, le célèbre phonographe qui, suivant le mot d'un journal américain, a eu pendant l'Exposition l'honneur de chanter devant le prince de Galles l'air national américain Yankee Doodle, et la malice de faire entendre au roi Kalakaua un autre chant populaire commençant par ces mots : *Il y avait un vieux nègre.* »<sup>2</sup>

La *Compagnie Continentale Edison* était également impliquée dès 1887 dans l'organisation de l'Exposition Universelle de 1889 à Paris puisqu'elle était en charge de l'éclairage électrique de l'Exposition.

---

<sup>1</sup> Edouard Vasseur, « Pourquoi organiser des Expositions universelles ? Le « succès » de l'Exposition universelle de 1867 », *Histoire, économie & société*, 2005/4 24e année, p573-594.

<sup>2</sup> C.-C. Soulages, « Exposition International d'Electricité. Les salles de l'exposition Edison », *La Lumière Electrique*, Volume 6, n°3, 21 janvier 1882, p61-62.

#### 4. Proposition de Gustave Cabanellas

Pour améliorer le système de distribution de Thomas Edison, Gustave Cabanellas recommandait soit d'augmenter la section des fils utilisés, soit de relier certaines lampes en série, même s'il reconnaissait que l'inconvénient était que dans ce cas ces lampes n'allaient plus être indépendantes les unes des autres.

Lors de ce même congrès, Gustave Cabanellas critiqua également la présentation qu'avait faite peu de temps avant devant l'Académie des Sciences le vice-président du congrès, Sir William Thomson. Conscient du rang des personnes auxquelles il s'adressait, il précisait en préambule de sa communication :

« Quand je serai forcé de rectifier des résultats de travaux antérieurs, j'entendrai expressément n'agir que dans l'intérêt du sujet et conserver dans leur entier le haut respect ou la grande considération qui sont dus à leurs auteurs »<sup>1</sup>.

La critique portait non plus sur le système de transport dans son ensemble mais sur la construction des machines et plus particulièrement leur excitation. Pour améliorer le rendement individuel d'une machine électrique, Gustave Cabanellas était en faveur d'une excitation en série alors que Sir William Thomson était en faveur d'une excitation en dérivation<sup>2</sup>.

#### b) 1886 – Expérience d'Hippolyte Fontaine

Contrairement à Marcel Deprez, Gustave Cabanellas ne fut pas directement à la tête d'expériences grandeurs nature, peut-être par manque d'appui institutionnel et financier. Cependant en 1886, en réponse à l'expérience insatisfaisante réalisée à Creil par Marcel Deprez, Hippolyte Fontaine réalisa une expérience mettant en pratique les principes théoriques énoncés par Gustave Cabanellas, après que ce dernier réussit avec succès à se mettre en contact avec lui.

---

<sup>1</sup> Gustave Cabanellas, *Congrès international des électriciens. Comptes-rendus des travaux*, Ministère des Postes et Télégraphes, 1882, Paris : G. Masson, p123.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p124.

En 1871, l'année où la machine Gramme fut présentée devant l'Académie des Sciences, Hippolyte Fontaine cofonda la *Revue Industrielle* que nous avons citée avec Amédée Bréguet.

Il fut le directeur de la compagnie *Gramme* dès sa création en 1872, jusqu'à la mort de Zénobe Gramme en 1901. Ces deux hommes et la compagnie qu'ils formèrent jouèrent un rôle important dans la commercialisation de l'électricité puisque les dynamos Gramme, qui portent le nom de leur inventeur, furent les premières machines industrielles à pouvoir produire de l'électricité. Ils réalisèrent la première démonstration publique de transport de force par l'électricité lors de l'Exposition universelle à Vienne en 1873.

À côté de l'entreprise Gramme, Hippolyte Fontaine créa plusieurs entreprises d'éclairage et de force motrice par l'électricité. Il fédéra les entrepreneurs de l'électricité au sein du *Syndicat de l'éclairage électrique et de la force motrice*, dont il était le président, et la *Chambre syndicale d'électricité* qu'il fonda en 1879. En 1881, il était membre du *Congrès des Electriciens* en charge des mesures et unités électriques, et l'un des deux responsables de la commission d'organisation de l'*Exposition Internationale d'Electricité*. Il était en charge de l'installation de tous les systèmes d'éclairage et de force motrice par l'électricité. Il avait sous sa supervision pour cette mission Antoine Bréguet (1851 - 1882), un autre membre de la famille Bréguet<sup>1</sup>.

Hippolyte Fontaine était membre du conseil de la *Société des Ingénieurs Civils* et membre fondateur de la *Société Internationale des Electriciens*, de laquelle il fut président en 1890. Il participa à la création du laboratoire central d'électricité à Paris. Il fut également un haut responsable de l'organisation de la section Electricité de l'*Exposition Universelle* de 1889, et maintint une grande influence sur celle de 1900. Ingénieur diplômé de l'*Ecole des Arts et Métiers* de Châlons-sur-Marne, il était aussi président de la *Société des Anciens Elèves des Arts et Métiers*.

---

<sup>1</sup> Antoine Bréguet était le fils de Louis Bréguet (1804 – 1883), pionnier de l'électricité en France, et l'arrière-petit-fils de l'horloger Abraham Bréguet (1747 - 1823).

Comme on le trouve résumé dans sa nécrologie publiée par le bulletin de cette Société, « pendant longtemps, il était à la tête de l'industrie électrique en France. »<sup>1</sup>

Pour réaliser son expérience en collaboration avec Gustave Cabanellas, Hippolyte Fontaine utilisa les machines, le laboratoire et le personnel de la compagnie qu'il fonda en 1883, la *Compagnie Electrique* :

« Pour faire ces expériences, nous nous sommes adressé à la « Compagnie Electrique », propriétaire des brevets de M. Gramme relatifs au transport des forces ; cette Compagnie a mis à notre disposition son laboratoire, son matériel et son personnel ; c'est donc grâce à son concours que nous avons réussi à les réaliser. »<sup>2</sup>

Hippolyte Fontaine démontra qu'au lieu d'une grande machine comme Marcel Deprez le proposait, il était possible d'utiliser des machines type commercial et de les relier en série, leurs tensions s'additionnant les unes à la suite des autres et permettant ainsi de produire une tension élevée, comme dans le système proposé par Gustave Cabanellas<sup>3</sup>. On retrouve le même esprit dans la solution proposée par Maurice Lévy, qui s'était finalement rallié au projet de Marcel Deprez. Sept au total furent utilisées, elles étaient toutes de construction identique, modèle Gramme type « supérieur ». L'électricité était produite par quatre machines reliées en série et reçue par trois machines, également reliées en série. Pour réaliser l'expérience, une résistance de 100 Ohms fut intercalée entre le groupe de machines génératrices et le groupe de réceptrices pour simuler la distance de transport, qui équivalait ainsi à 10km. Les machines génératrices étaient reliées à une machine à vapeur. Les résultats obtenus furent les suivants :

Vitesse de la machine à vapeur	56 tours
Vitesse des machines Gramme génératrices	1298 tours/minute
Tension aux bornes de la 1ère machine génératrice	1490 V
Tension aux bornes de la 2ème machine	1505 V
Tension aux bornes de la 3ème machine	1493 V

---

<sup>1</sup> Nécrologie d'Hippolyte Fontaine, *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1910, p127.

<sup>2</sup> « Expériences de transport de force au moyen de machines dynamo-électriques couplées en série », *Revue industrielle*, 4 novembre 1886, p442.

<sup>3</sup> Henry de Graffigny (1907), *Les moteurs électriques*, Paris : Librairie des publications populaires.

Tension aux bornes de la 4ème machine	1508 V
Tension totale générée	5896 V
Intensité du courant	9,34 A
Résistance de la ligne	100 Ohms
Puissance sur le piston de la machine à vapeur	112,8 chevaux
Rendement de la machine à vapeur	85%
Puissance mécanique reçue par les génératrices	95,88 chevaux
Vitesse des moteurs	1120 tours/minute
Puissance mécanique développée par les moteurs	49,98 chevaux
Rendement mécanique	52%

Au total, les sept machines coûtèrent 16450 francs<sup>1</sup>. Leur rendement et leur poids par rapport au travail fourni étaient significativement meilleurs que ceux obtenus à Creil. Si on cumule le coût des quatre expériences de Marcel Deprez, le coût est sans comparaison. Le 26 octobre 1886, une note sur les expériences d'Hippolyte Fontaine, qui avaient eu lieu en juillet 1886, fut présentée à l'*Académie des Sciences* par le physicien Eleuthère Mascart (1837 – 1908), premier directeur de l'*Ecole Supérieure d'Electricité*. Dans les comptes-rendus de la *Société des Ingénieurs Civils*, c'est le directeur de la *Compagnie Electrique*, Dehenne, qui en parle : « Notre collègue [Hippolyte Fontaine] a réussi à montrer qu'il n'est pas nécessaire, pour obtenir ce résultat, de créer un matériel spécial, encombrant et coûteux ; qu'il suffit de grouper convenablement les éléments industriels destinés aux applications courantes. Ce qui caractérise les expériences dont nous parlons, c'est en effet l'emploi de machines dynamos ordinaires, d'éléments mécaniques bien coordonnés, formant un ensemble essentiellement pratique. »<sup>2</sup>

Hippolyte Fontaine put vérifier l'un des principes défendu par Marcel Deprez selon lequel plus la vitesse de la génératrice était élevée, plus le rendement augmentait. A 600 tours/minute, le rendement électrique était de 79% et à 1400 tours/minute, de 81%. La tension maximale aux bornes de chaque machine était de 1600 V ; au-delà, le rendement de la machine diminuait à cause de la production d'étincelles. Avec les machines reliées en série, il put produire une tension totale de près de 6000V, légèrement supérieure à celle que Marcel

---

<sup>1</sup> « Expériences de transport de force au moyen de machines dynamo-électriques couplées en série », *Revue industrielle*, 4 novembre 1886, p442.

<sup>2</sup> « Expérience sur la transmission de force par l'électricité, Note de M. G. Dehenne », Séance du 5 août 1887, *Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils*, 1887, 2ème semestre, p91.

Deprez avait difficilement réussi à produire avec une seule machine à Creil. Hippolyte Fontaine écrivait dans sa revue, la *Revue Industrielle* :

« Ces expériences prouvent qu'il est possible de transporter une force effective de 50 chevaux à travers une résistance de 100 ohms avec un rendement industriel supérieur à 50% en employant des machines électriques n'ayant aux bornes qu'une différence de potentiel de 1.500 volts. »<sup>1</sup>

#### 4. Contexte politique et financier autour de la dernière expérience de Marcel Deprez

On ne peut faire le bilan de la dernière expérience de Marcel Deprez et de la réponse de Gustave Cabanellas sans faire un détour par le contexte politique dans lequel des deux expériences furent faites. Ce contexte particulier s'empara du débat d'idées entre les deux hommes.

##### a) Guerre des revues. Scandales financiers & antisémitisme

###### 1. Cornelius Herz et le scandale de Panama

La dernière expérience de Marcel Deprez à Creil fut soutenue financièrement par Edmond de Rothschild et Cornélius Herz. Ce dernier était l'un des fondateurs de la revue *La Lumière Electrique*, créée en 1879, soit huit ans après la *Revue Industrielle* d'Hippolyte Fontaine. Les autres fondateurs étaient Jules Bapst, directeur du *Journal des Débats* (publié de 1789 à 1944), Adrien Hébrard, directeur du journal *Le Temps* (publié de 1861 à 1942), Georges Berger, directeur des *Expositions Universelles* de 1876 et 1889 et le baron Jacques de Reinach (1840 – 1892). Théodose du Moncel était le directeur scientifique de la revue. L'objectif était de donner une voix institutionnalisée aux professionnels de l'électricité, et de faire se rencontrer les mondes scientifique et industriel.

---

<sup>1</sup> « Expériences de transport de force au moyen de machines dynamo-électriques couplées en série », *Revue industrielle*, 4 novembre 1886, p442.

La revue fut publiée de 1879 à 1894, puis les fondateurs décidèrent de changer son nom en *L'Eclairage Electrique*, dans l'espoir de faire oublier les liens du baron Jacques de Reinach et Cornelius Herz avec le scandale de Panama. Elle redevint *La Lumière Electrique* en 1908 jusqu'à la fin de sa publication en 1916.

Avant le scandale, commença la construction du canal de Panama, situé entre l'Océan Atlantique et l'Océan Pacifique. Le projet, français, fut lancé en 1880 avec la création de la *Compagnie universelle du canal interocéanique de Panama*. Il faisait suite à la réussite de la construction du canal de Suez. L'idée était de réduire les coûts de transport des bateaux en créant un raccourci sur les terres d'Amérique centrale, entre les deux océans Atlantique et Pacifique. Pour réaliser une telle opération, d'énormes capitaux étaient nécessaires. L'Etat ainsi que 85 000 épargnants particuliers, sollicités au moyen de la presse, furent impliqués dans le financement de la construction du canal.

On peut déjà faire un parallèle entre la construction du canal de Panama et celle de l'industrie électrique française, deux projets de très grande envergure dont les objectifs étaient de réduire les coûts de transport (des bateaux et de leurs marchandises dans un cas, de l'énergie dans l'autre), et qui n'étaient réalisables qu'au moyen de sommes d'argent très importantes. Le deuxième parallèle à faire est que nous retrouvons en partie les mêmes personnes impliquées dans les deux projets. En effet, l'un des points de contact entre la *Compagnie universelle du canal interocéanique de Panama* et les patrons de presse était Cornélius Herz. L'argent reçu pour y faire paraître les annonces était celui du baron Jacques de Reinach. Lorsque les conditions climatiques et les maladies des ouvriers mal maîtrisées ralentirent la construction, et que finalement, en 1889, la *Compagnie universelle du canal interocéanique de Panama* fut mise en liquidation judiciaire, on accusa le baron Jacques de Reinach de corruption de parlementaires. En 1892, il fut retrouvé assassiné et le scandale de Panama fut divulgué dans la presse, alors en plein essor. Cette même année, Cornelius Herz émigra en Angleterre pour ne jamais revenir. En 1903, le projet fut finalement revendu à des Nord-Américains qui se chargèrent de finir de creuser le canal.

Ainsi, se trouvaient au cœur du scandale des hommes politiques, des hommes de presse et des industriels. Comme le rappelle l'historien Jean Bouvier, la corruption n'était étrangère à aucun de ces milieux. Pour décrire cette période « fin de siècle », il écrivait : « Le temps n'est plus où un homme public pouvait être un lettré, un juriste : il faut qu'il soit pénétré de l'esprit commercial, industriel, financier. »<sup>1</sup>

Cornélius Herz, de confession juive, né en Allemagne, était courtier et agent de change. Certains Français, déjà adeptes de la théorie du complot, soupçonnèrent que le scandale de Panama fut manigancé par les Allemands. L'historien Emmanuel Chadeau écrit à ce propos : « Si le Panama avait déconsidéré la France, ses projets et son épargne, c'est que sur une noble cause s'était greffé le « prurit » des intérêts anti-français, symbolisés par la banque et le négoce juifs. »<sup>2</sup>

Le méchant dans les récits officiels était donc Cornélius Herz. Un journaliste et écrivain, Gustave Le Rouge, connut même un grand succès avec son roman en cinq volumes *Le mystérieux docteur Cornélius*, paru en 1911-1912 et adapté en série télévisée en 1984. Le héros, Cornelius Kramm, est un scientifique manipulateur et immoral, assoiffé de pouvoir, qui n'hésite pas par exemple à kidnapper un vieux savant français de génie pour l'obliger à travailler pour lui ou alors, toujours avec des techniques dernier cri, à faire de la chirurgie esthétique afin de se faire passer pour une autre personne qui se retrouve pendant ce temps quasi-mort dans un asile de fous.

Pour Emmanuel Chadeau, on se trouvait néanmoins plus proche de la vérité lorsque l'on attribuait ce rôle de méchant à Ferdinand de Lesseps (1805 – 1894) : le « héros français du canal de Suez, fatigué et mal conseillé, avait par vanité acheté au prix fort à des Américains découragés et habiles une concession boiteuse assortie d'actifs sans intérêts. »<sup>3</sup> D'ailleurs, un des neveux de Ferdinand de Lesseps, de même que Gustave Eiffel (1832 – 1923), ingénieur contractuel pour la *Compagnie universelle du canal interocéanique* appelé en renfort sur l'étude technique du percement du canal, furent condamnés pour publicité mensongère pour avoir incité les

---

<sup>1</sup> Jean Bouvier (1964), *Les deux scandales de Panama*, France : René Julliard.

<sup>2</sup> Emmanuel Chadeau, « L'épargne nationale trahie », dans Pierre Birnbaum (sous la direction de), *La France de l'affaire Dreyfus*, Editions Gallimard, 1994, p362-384, p371.

<sup>3</sup> Ibid., p372.

particuliers, via la presse, à acheter les bons de la Compagnie, et les banques, via des intermédiaires, à investir<sup>1</sup>.

Pour Emmanuel Chadeau, cette différence de traitement par l'opinion publique s'expliquait par la confession des groupes de personnes impliquées, Catholiques contre Juifs. A propos de Ferdinand de Lesseps, il écrit :

« (...) Les progrès du nationalisme dans l'opinion économique étaient tels que l'idée d'une remise en cause des choix fondamentaux (qui dataient de 1879-1880) du perceur d'Isthme (membre de l'Académie française) et de son autorité dans l'*establishment* bien pensant des affaires (de Lesseps donnait de lui l'image d'un monarchiste catholique) ne vint à personne. Et personne ne souligna que le premier acteur de la spéculation était la Caisse d'escompte et de dépôts, une banque où œuvrait avec zèle un neveu du grand homme et où l'on rencontrait, parmi les fondateurs et les actionnaires, des représentants distingués et opulents du monde politique réactionnaire catholique. »<sup>2</sup>

Déjà à la fin des années 1870, lorsqu'une banque catholique, la banque de l'Union générale, fit faillite, l'opinion publique accusa des financiers juifs d'en être responsables. Elle fut fondée en 1876 par Eugène Bontoux, ingénieur, et était soutenue par le Vatican et la cour de Vienne. Le programme de cette banque était radical : « soustraire l'épargne française à l'influence de la banque d'origine protestante ou juive, et [de] lui assurer des débouchés « naturels » conformes à l'esprit national »<sup>3</sup>. Après sa faillite, des millions de francs-or issus de l'industrie lyonnaise et du Nord furent perdus. Cela eut également des retombées sur les banques « cosmopolites »<sup>4</sup>, mais ce furent quand même elles les coupables, l'ennemi tout désigné dès la création de la banque. Pour Emmanuel Chadeau, « une légende était née »<sup>5</sup>. Selon lui, cet antisémitisme s'expliquait par de multiples facteurs : la défaite contre l'Allemagne en 1871 avait traumatisé la France, la concurrence avec l'Angleterre et les Etats-Unis aussi. Pour s'en sortir et justifier tout cela, une partie de la population expliqua tous ces événements à la lumière d'une théorie où les Juifs, espions étrangers, étaient venus voler la France. L'historien rappelle que « l'énonciation des thèmes antisémites – le juif étranger à l'économie

---

<sup>1</sup> Ibid., p372.

<sup>2</sup> Ibid., p373.

<sup>3</sup> Ibid., p370.

<sup>4</sup> J. Bertrand, *ibid.*, p201.

<sup>5</sup> Emmanuel Chadeau, *ibid.*, p371.

« vraie » du pays et, par corrélation, le juif détourné du bien d'autrui ou du bien collectif – est alors devenue d'une telle banalité, qu'elle s'incorpore à la littérature non seulement « populaire », mais « de gare »<sup>1</sup>. On l'a vu avec Gustave Le Rouge, et on le retrouve également dans un autre style chez Honoré de Balzac, qui se basa sur James de Rothschild pour créer son personnage du baron de Nucingen. James de Rothschild était le père d'Edmond de Rothschild que nous avons déjà mentionné comme membre de la commission en charge d'évaluer les expériences de Marcel Deprez à Creil, expériences qu'il finança. Avec son frère Alphonse, ce dernier fut impliqué comme d'autres banques dans le scandale de Panama. Ils avaient aussi des liens avec la *Société Industrielle des Téléphones*, dont la presse catholique considérait que les titres étaient des valeurs de second ordre car elle avait été fondée par des ingénieurs et capitalistes au nom suspect<sup>2</sup>. Les fondateurs de la *Société Industrielle des Téléphones* furent accusés par cette presse « d'avoir joué à la baisse sur les cuivres, pour en être consommateurs, avec l'appui « de spéculateurs internationaux » - parmi lesquels les Rothschild »<sup>3</sup>.

## 2. Le cuivre et la faillite du Comptoir d'Escompte de Paris

### a) La faillite

Les frères Rothschild avaient également beaucoup investi dans le cuivre. L'exploitation de ce métal connut un développement important dans le monde dans la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle avec l'essor de l'industrie électrique. À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les Etats-Unis, le Canada, l'Australie, la Russie, le Congo et surtout le Chili possédaient les plus importantes réserves de cuivre. Dans un premier temps, le cuivre venait principalement du Chili et de l'Australie. Les Etats-Unis se mirent ensuite à exporter, ce qui divisa les prix presque par deux entre le début des années 1870 et 1886<sup>4</sup>. Les prix continuèrent de baisser de manière quasi-continue pendant 15 ans à partir de 1885<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup> Ibid., p374.

<sup>2</sup> Ibid., p374.

<sup>3</sup> Ibid., p374.

<sup>4</sup> Pierre-Cyrille Hautcoeur, Angelo Riva, Eugene N. White, "Floating a "Lifeboat": the Banque de France and the Crisis of 1889", Manuscript Number: 14-024 NOV13 CRN ARTICLER1, p7.

<sup>5</sup> E. Desroziers « Sur les lampes à incandescence du type Cruto », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1885, p131-143, p131 à 133.

En France, l'entreprise *Rothschild frères* avait le contrôle de la compagnie géante de cuivre *Rio Tinto*. Pierre-Eugène Secrétan, ingénieur, tenta lui aussi de créer un monopole du cuivre. Pour ce faire, il cofonda en 1887 une entreprise, la *Société Industrielle et Commerciale des Métaux* ainsi qu'un syndicat lui permettant d'emprunter de l'argent auprès des banques privées pour acheter du cuivre. En 1888, Pierre-Eugène Secrétan obtint également la participation du *Comptoir d'Escompte* de Paris, banque commerciale. Ce partenariat n'aurait pu se faire sans les liens entre les dirigeants de la *Société Industrielle et Commerciale des Métaux* et les dirigeants du *Comptoir d'Escompte* selon Pierre-Cyrille Hautcoeur, Angelo Riva, Eugene N. White, qui parlent de conflit d'intérêt<sup>1</sup>. Le *Comptoir d'Escompte*, dont le président était Eugène Denfert-Rochereau se mit donc à prêter de l'argent pour l'achat de cuivre, à la fois sur le bilan et hors bilan. La *Société Industrielle et Commerciale des Métaux* put ainsi doubler son capital.

L'entreprise *Rothschild frères* participait à hauteur de 5 millions de francs en obligations et actions au capital de la *Société Industrielle et Commerciale des Métaux*, puis venait la *Banque de Paris et des Pays-Bas* (3,4 millions de francs), et le *Comptoir d'Escompte* (2,1 millions de francs). Dans un premier temps, au début de l'année 1888, la Banque de France examina les comptes de la société et ne trouva rien à y redire<sup>2</sup>.

Peu de temps après, la société obtint un crédit de 52 millions de francs contre 40 000 tonnes de cuivre évalué à 65% du prix du marché<sup>3</sup>. Ceci alerta la Banque de France qui nota que le montant de ce prêt était anormal.

A la fin de l'année 1888, les prix du cuivre continuaient de baisser et la *Société Industrielle et Commerciale des Métaux* commença à perdre de sa valeur. La Banque de France continuait de se méfier et certaines banques, sauf le *Comptoir d'Escompte*, ne souhaitèrent pas renouveler leur offre de garantie.

---

<sup>1</sup> Pierre-Cyrille Hautcoeur, Angelo Riva, Eugene N. White, *ibid.*, p8.

<sup>2</sup> Pierre-Cyrille Hautcoeur, Angelo Riva, Eugene N. White, *ibid.*, p9.

<sup>3</sup> Pierre-Cyrille Hautcoeur, Angelo Riva, Eugene N. White, *ibid.*, p9.

Au début de l'année suivante (le 20 février 1889), au moment où le prix du cuivre continuait de chuter, Pierre-Eugène Secrestan créa une autre entreprise, la *Compagnie auxiliaire des métaux*, avec un capital de 40 millions de francs. Au même moment, Alphonse de Rothschild envoya un télégramme aux gestionnaires de mines de cuivre américaines afin de renégocier les contrats, et leur annonçant, dans le but de les rassurer, que la *Maison Rothschild* de Paris avait prêté 6 millions de francs au *Comptoir d'Escompte*<sup>1</sup>.

Finalement, le 2 mars 1889, les pertes générées par le *Comptoir d'Escompte* furent officiellement reconnues par la *Banque de France*, suite à une réunion avec Eugène Denfert-Rochereau la veille. Le 5 mars 1889, ce dernier se suicidait. La ruée vers le *Comptoir d'Escompte* commença et les dépositaires retirèrent leur argent.

#### *b) Mesures prises après la faillite du Comptoir d'Escompte*

Le 8 mars 1889, la *Banque de France* décida de prêter 100 millions de francs au *Comptoir d'Escompte*, devenu insolvable, sur demande du ministre des finances, contre un collatéral de 20 millions de francs. Frédéric de Pillet-Will, un des régents de la *Banque de France*, démissionna suite à cette décision ; il aurait notamment voulu que le collatéral soit de 75 millions. Le *Comptoir d'Escompte* n'avait pas ces 20 millions, ce dont les régents de la *Banque de France* se rendirent compte rapidement. Sur les 100 millions, 94 servirent à rendre leur argent aux dépositaires de la banque. Le 16 mars, la *Banque de France* prêta 40 millions supplémentaires au *Comptoir d'Escompte*. La *Banque de Paris et des Pays-Bas*, avec quatre autres banques prêta également 37 millions de francs. L'effet de cette intervention, décrit dans le *Journal des Economistes* en 1889 :

« Cette intervention, qui a atteint le total de 177 millions et qui a sauvé le Comptoir en lui évitant de suspendre ses paiements, a été un acte de sagesse. Elle a détourné de la place de Paris un désastre dont la portée eût été incalculable et qui eût ébranlé le crédit public et privé. Elle fait honneur à M. Rouvier et à ceux qui ont coopéré à cette œuvre de salut. On a échappé à un run qui eût épuisé rapidement les ressources des autres institutions de crédit, demeurées cependant étrangères à l'affaire du cuivre. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Un nantissement est une garantie pour le créancier qui obtient un droit sur son débiteur.

<sup>2</sup> Arthur Raffalovich, « L'effondrement du Comptoir d'Escompte », *Le Journal des Economistes*, 15 juin 1889, p330.

La *Société industrielle et commerciale des Métaux* déposa le bilan le 21 mars 1889. Le conseil d'administration du *Comptoir d'Escompte* démissionna le 23 mars 1889 et déposa une demande de liquidation privée. La Banque de France se remboursa ses prêts auprès du *Comptoir d'Escompte* en acquérant ses stocks de cuivre. Avec le ministère des finances, elle créa la *Comptoir National d'Escompte de Paris*.

Après la faillite, on décida d'une nouvelle organisation au sein de la direction du *Comptoir d'Escompte* : « Les statuts de l'ancien Comptoir ont été revus et corrigés. On a modifié les attributions du Directeur, qui perd son autonomie et reste subordonné au Conseil d'administration ; on a créé une commission de contrôle, qui sera chargée d'exercer une surveillance permanente sur les opérations et sur les écritures. C'est un rouage calqué sur ce qui se fait dans les grandes banques russes. »<sup>1</sup>

Pierre-Eugène Secrétan et son associé Joseph-Emile Laveissière furent condamnés à 6 mois et 3 mois de prison respectivement. Pierre-Eugène Secrétan en fit seulement 3 et le second n'y alla pas. Les membres du conseil d'administration de la *Société industrielle et commerciale des métaux* et ceux du *Comptoir d'escompte*, furent également poursuivis et condamnés à de lourdes amendes. Pierre-Eugène Secrétan et Edouard Hentsch, président du *Comptoir d'escompte*, furent ruinés après cette affaire.

Pour Pierre-Cyrille Hautcoeur, Angelo Riva et Eugene N. White, c'est l'expérience de la faillite de la banque de l'Union Générale peu de temps avant qui joua dans les mesures prises par la Banque de France. Les régents ne souhaitaient pas que la faillite du *Comptoir d'Escompte* ne se répande sur les autres banques françaises. Le *Comptoir d'Escompte* était la deuxième plus grande banque de dépôt à Paris, elle investissait dans le commerce de la France vers l'étranger, elle prêtait aux petites et moyennes entreprises et gérait des opérations financières pour le gouvernement<sup>2</sup>.

Dans le contexte antisémite dans lequel se trouvait la France, les coupables de cette faillite furent une nouvelle fois les Rothschild.

---

<sup>1</sup> Ibid., p334.

<sup>2</sup> Pierre-Cyrille Hautcoeur, Angelo Riva, Eugene N. White, *ibid.*, p14.

### *b) Instrumentalisation de l'opposition entre Gustave Cabanellas et Marcel Deprez*

En 1886, Edouard Drumont, journaliste et écrivain antisémite, fit paraître un ouvrage intitulé *La France juive* qui remporta un certain succès. En 1892, il créa le journal antisémite *La libre parole*. Edouard Drumont est le journaliste qui divulgua le nom des hommes politiques impliqués dans le scandale de Panama. Il reçut l'information directement du baron Jacques de Reinach, l'un des cofondateurs de *La Lumière Electrique* accusé de corruption de parlementaires et retrouvé assassiné. Edouard Drumont était alors emprisonné pour une peine de courte durée, suite à une accusation de diffamation pour un article paru dans son journal dans lequel il accusait un député d'avoir reçu des pots de vin de la part d'Alphonse de Rothschild, régent de la banque de France et soutien financier de Marcel Deprez<sup>1</sup>.

Dans son ouvrage *La France juive*, Edouard Drumont évoqua les liens entre Marcel Deprez et la banque *Rothschild frères*. Il érigea Gustave Cabanellas et ses travaux sur le transport de force par l'électricité en victime de leur complot. Il se servit de l'opposition publique entre Marcel Deprez et Gustave Cabanellas pour alimenter son propos antisémite.

Comme Marcel Deprez, Gustave Cabanellas était fils de médecin. Son père était président de la *Société Médicale de l'arrondissement de l'Elysée (ancien 1<sup>er</sup> arrondissement)* en 1860<sup>2</sup>.

Il entra à l'Ecole navale le 3 octobre 1855, à l'âge de 16 ans. Il gravit tous les échelons jusqu'à devenir capitaine de frégate. Il choisit de se spécialiser dans le domaine de l'électricité et commença ses travaux sur le terrain, alors qu'il était encore à l'armée. Il fut notamment à la tête d'une série d'expériences d'éclairage. Il prit sa retraite à la fin de son temps de service, en 1879, alors qu'il n'était plus en activité pour causes d'infirmités contractées lors de ses voyages en mer et pendant la guerre de 1870 à Paris. Il dut alors attendre cinq ans un poste dans l'administration des finances<sup>3</sup>, et consacra ce temps à l'élargissement de ses connaissances sur l'électricité, plus spécialement sur les machines électriques à courant continu et sur le transport d'électricité utilisée comme force motrice.

---

<sup>1</sup> Pierre Birnbaum (sous la direction de), *La France de l'affaire Dreyfus*, Editions Gallimard, 1994.

<sup>2</sup> J. F. Gustave Cabanellas, « Quelques mots sur le sulfate de quinine », *Société Médicale de l'arrondissement de l'Elysée (ancien 1<sup>er</sup> arrondissement)*, 5 janvier 1860.

<sup>3</sup> Jean Armengaud, « Notice nécrologique sur Gustave Cabanellas », *Société des Ingénieurs Civils*, 1888, 2ème semestre, Séance du 19 octobre 1888, p644 à 648.

Il contribua à fonder la *Société Internationale des Electriciens* en 1883. Cette société est à l'origine de la création du Laboratoire central d'électricité en 1888 et de l'Ecole Supérieure d'Electricité en 1894, tous deux rattachés au ministère des Postes et Télégraphes. Contrairement à l'Allemagne ou à l'Angleterre, la France n'avait alors pas encore de « grands établissements d'électricité »<sup>1</sup>. La décision de créer ces institutions fut prise lors du *Congrès International d'Electricité* en 1881, à partir des gains de l'Exposition qui avait lieu en même temps (325 000 francs) et qui attira de nombreux visiteurs. Gustave Cabanellas était membre de la commission « chargée d'élaborer le projet de création et d'organisation du Laboratoire »<sup>2</sup> avec notamment le directeur de l'entreprise *Siemens* à Paris, G. Boistel, et le directeur de l'entreprise *Edison* à Paris, Romuald-Victor Picou. L'objectif de ce laboratoire lors de sa création était de fournir une formation théorique et pratique en électricité aux ingénieurs français et étrangers diplômés de grandes écoles d'ingénieurs, et de donner un lieu d'expérimentations aux industriels.

En plus de la *Société Internationale des Electriciens*, Gustave Cabanellas était également membre de la *Société des Ingénieurs Civils* ; il prenait souvent la parole aux réunions de ces deux sociétés savantes, comme beaucoup d'autres. Notons cependant que Marcel Deprez ne faisait partie ni de l'une ni de l'autre.

En réponse à Edouard Drumont, Gustave Cabanellas rédigea une lettre en réponse dans laquelle il s'expliquait :

« C'est au Congrès de 1881 que je me suis vu forcé de devenir l'adversaire scientifique de M. Deprez, qui cherchait à établir qu'avec l'Electricité, *le rendement d'un transport est indépendant de la distance*. J'ai prouvé théoriquement et pratiquement l'erreur de cette affirmation. »<sup>3</sup>

Gustave Cabanellas se considérait comme le premier à avoir pensé en France le transport de l'électricité à longue distance. Marcel Deprez était selon lui venu sur le sujet plus tard, et n'envisageait au départ que de transporter le courant sur de faibles distances :

« M. Deprez jugeait que le seul objectif réalisable était, dans des proportions restreintes, comme il l'essayait à cette époque, de se servir de l'Electricité pour distribuer la force de la machine à vapeur

---

<sup>1</sup> Frank Géraldy, « Causeries électriques – Le poste central des télégraphes à Paris, *La Lumière Electrique*, Volume 1, n°10, 15 novembre 1879, p190 à 193, p192.

<sup>2</sup> Bulletin de la *Société Internationale des Electriciens*, p74.

<sup>3</sup> *Lettre de M. Gustave Cabanellas à M. Drumont*, 18 novembre 1886, Paris : G. Masson, p3.

d'un atelier aux diverses machines-outils de cet atelier, ce qui m'a fait dire : « Après cette non-invention, après cette négation expresse, il serait intéressant de rechercher par quel phénomène, par quelle organisation de Légende et de Presse on est arrivé à faire, en général, dans le Public, du nom de M. Deprez, le synonyme de Transport de l'Énergie. » J'ajoutais : « Puisque l'ambition de M. Deprez était tout au plus de la Transmission sur place, il est certain que si le Transport à longue portée n'était pas possible, le vrai coupable ne serait pas M. Deprez : je tiens à porter le poids de cette responsabilité qui m'incombe positivement ; M. Deprez n'étant qu'un converti, un complice du lendemain, a droit à beaucoup plus d'indulgence. » »<sup>1</sup>

Dans cette lettre, Gustave Cabanellas considérait non seulement être le premier à avoir pensé le transport de l'électricité comme force motrice à grande distance, mais c'était en plus grâce à lui que Marcel Deprez eut l'opportunité de réaliser sa première grande expérience publique :

« (...) J'ai été forcé de reconnaître que bien du temps a été perdu, et que ce Savant n'a pas répondu aux espérances qu'inspirait la foi contagieuse qu'il avait en lui-même lorsqu'il y a quelques six ans j'ai réussi à lui faire confier le soin des expériences. »<sup>2</sup>

Gustave Cabanellas sous-entend ici que c'était lui qui milita pour que Marcel Deprez fut en charge de l'installation d'un transport de force par l'électricité entre Miesbach et München en 1882.

La lettre de Gustave Cabanellas nous en dit également plus sur les liens entre Cornelius Herz et Gustave Cabanellas. Ce dernier fut un collaborateur de *La Lumière Electrique* dès son lancement en 1879, sous le pseudonyme Gessé la première année puis sous son vrai nom ensuite. C'est d'ailleurs Cornélius Herz, dans un article paru la première année, qui dévoila son identité. Il cessa cependant sa collaboration avec la revue dès 1882. Lorsque Cornelius Herz commenta les expériences de Marcel Deprez à München en 1882, il eut les mots suivants :

« Le soin scrupuleux avec lequel M. Marcel Deprez écarta toute mise en scène inutile qu'il aurait considérée comme indigne du public d'élite qu'il avait convié à cette expérience, fut naturellement mal interprété par un certain nombre de petits écrivains pseudo-scientifiques qu'on avait oublié

---

<sup>1</sup> Lettre de M. Gustave Cabanellas à M. Drumont, 18 novembre 1886, Paris : G. Masson, p3.

<sup>2</sup> Ibid., p6.

d'inviter, dont le dépit et la confusion croissent au fur et à mesure que le succès de l'œuvre entreprise par M. Deprez va en s'affirmant. »<sup>1</sup>

Lorsque Cornelius Herz parlait des « écrivains », pensait-il à Gustave Cabanellas ? Tout au long de sa carrière il avait été explicitement critiqué pour son style d'écriture de manière quasi unanime par ses collègues. Un texte de deux pages de P. Clémenceau paru dans *La Lumière Electrique* ne concerne que son style d'écriture<sup>2</sup>. Dans la nécrologie de Gustave Cabanellas dans la même revue, on peut lire :

« Ses travaux sur la théorie des dynamos et celle du transport de force, bien qu'empreints d'un caractère d'abstraction extrême qui en rend la lecture et la compréhension assez pénibles, témoignent d'un esprit élevé, et d'idées très avancées. »<sup>3</sup>

Dans la nécrologie du *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens* on lit aussi :

« La forme sous laquelle sa pensée s'enveloppait la rendait souvent difficile à saisir, et je suis persuadée que, dans l'avenir, on constatera que Cabanellas avait eu des aperçus sur bien des points dont l'importance avait d'abord échappé. »<sup>4</sup>

Et enfin dans la nécrologie de la *Société des Ingénieurs Civils*, où l'on faisait également référence à son style d'écriture particulier, mais cette fois de manière moins négative :

« Dans le langage éloquent et très imagé qu'il affectionnait pour exposer ses idées, on trouve au milieu de développements philosophiques et quelquefois même métaphysiques des lueurs qui éclairent les profondeurs de ses pensées. »<sup>5</sup>

Dans la lettre de Gustave Cabanellas à Edouard Drumont, on comprend que la rupture entre Gustave Cabanellas et Cornelius Herz avait une cause financière. Ce dernier organisa le rachat des brevets de Gustave Cabanellas, Marcel Deprez et Edouard Hospitalier par certains de ses proches, non cités. Cornelius Herz avait pour projet de créer une société financière où chacun de ces trois ingénieurs aurait eu une part égale et de faire un appel aux capitaux. Gustave Cabanellas s'y opposa publiquement, au moyen de ses mémoires présentés devant les sociétés savantes en vue de l'époque, la *Société Française de Physique* et la *Société des*

---

<sup>1</sup> Cornelius Herz, « Transport Electrique de la force. Expériences du chemin de fer du Nord », *La Lumière Electrique*, Volume 8, 3 mars 1883, p271 à 283, p271.

<sup>2</sup> P. Clémenceau, « Chronique. Sur la conférence de M. G. Cabanellas à l'Observatoire de Paris », *La Lumière Electrique*, Volume 18, 1885, p134-135.

<sup>3</sup> Nécrologie de Gustave Cabanellas, *La Lumière Electrique*, 1888, Volume 30, p98.

<sup>4</sup> Nécrologie de Gustave Cabanellas, *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1889, p169.

<sup>5</sup> Nécrologie de la *Société des Ingénieurs Civils*, 1888, p644-647. Notons également que le père de Gustave Cabanellas était le témoin de mariage de la mère de Marcel Proust, Jeanne. Source : Evelyne Bloch-Dano (2004), *Madame Proust*, Grasset.

*Ingénieurs Civils*, car la solution technique qui allait être mise en place était celle de Marcel Deprez, qu'il jugeait inefficace :

« Mes relations avec M. Herz ont commencé par un traité de cession de mes brevets qui se sont trouvés dans les mêmes mains que ceux de M. Hospitalier et plus tard ceux de M. Deprez. J'ai eu bientôt des regrets : en même temps que les engagements de mon contrat n'étaient pas exécutés, on venait m'offrir une somme considérable croyant que j'étais le maître d'autoriser l'exploitation de mes brevets à l'Etranger.

Vous écrivez que M. Herz m'aurait offert 1 500 000 francs pour dire que le problème était résolu ; cela n'est pas littéralement exact, quoique moralement le fond soit le même : il ne m'a rien été offert, mais j'ai sciemment, par une Communication orale à la Société française de Physique, rendu impossible la formation, projetée, disait-on, d'une Société financière dont ma part légale eût atteint facilement le chiffre que vous citez.

J'ai jugé, dans ces conditions, que le silence même eût été un manque d'honnêteté, puisque j'étais en mesure de prouver qu'un appel aux capitaux se serait appuyé sur une erreur matérielle.

Plus tard, une seconde tentative financière aurait trouvé place après les expériences de M. Deprez, d'un transport de quatre chevaux à la Gare du Nord en passant par le Bourget. Cette fois encore, j'ai coupé court par une grande Communication sur l'ensemble de la Question, à la Société des Ingénieurs Civils ; comme corollaire, je montrais qu'il ne fallait rien croire des affirmations intéressées représentant cette expérience comme la répétition et la confirmation des soi-disant merveilleux résultats de Munich.

Ce travail, qui m'empêchait de m'enrichir, m'a valu par la suite la Médaille d'or des Ingénieurs Civils en 1884. »<sup>1</sup>

Gustave Cabanellas avait-il anticipé que la solution de Marcel Deprez allait échouer et cherchait-il à protéger ses intérêts, puisqu'il était financièrement lié à Marcel Deprez par l'entremise de Cornelius Herz ? Ou alors, était-il jaloux du choix porté sur la solution de Marcel Deprez, qui semblait avoir une force de conviction plus grande que la sienne puisqu'il réussit à se laisser séduire lui-même ? Quoiqu'il en soit, il semble que ses efforts furent vains comme il le reconnaissait lui-même, puisqu'ils n'empêchèrent pas la création d'une entreprise, avec l'appui financier des Rothschild. Il la qualifiait de « grandiose Société d'Etudes »<sup>2</sup>, trop théorique et pas suffisamment pratique selon lui.

---

<sup>1</sup> Lettre de M. Gustave Cabanellas à M. Drumont, 18 novembre 1886, Paris : G. Masson, p7.

<sup>2</sup> Ibid.

Concernant les relations de Marcel Deprez avec *La Lumière Electrique*, il commença à rédiger des articles une année après son lancement, en 1880. Le premier parut le 1<sup>er</sup> avril 1880 sous le titre « Mesureur d'énergie », dont nous avons parlé précédemment. Sa collaboration cessa après 1886, après les expériences à Creil et date à laquelle parut l'ouvrage d'Edouard Drumont.

## **5. Succès du courant continu en Suisse avec René Thury (1860 – 1938) 1886 – 1889 : Bourganeuf, ville où René Thury et Marcel Deprez se sont croisés**

### *a) René Thury à Bourganeuf*

Bourganeuf était une petite ville industrielle de 3 600 habitants située dans la Creuse, reliée aux chemins de fer, et où l'on trouvait des usines de porcelaines et de chapeaux. C'est dans cette ville que continua de se jouer en France la guerre du courant continu.

En 1886, le maire fit appel à un entrepreneur nommé Ernest Lamy pour remplacer l'éclairage à huile, dont il n'était pas satisfait, par l'éclairage électrique. Il signa un contrat de 40 à 50 ans avec la municipalité pour l'éclairage public et privé, à hauteur de la puissance fournie par une chute d'eau située dans la ville. L'électricité était produite par une dynamo conçue par l'ingénieur suisse René Thury (1860 – 1938), construite à Genève par l'entreprise fondée par Henri Cuenod et Alfred de Meuron. Ce n'était pas le seul partenariat signé entre Henri Cuénod et Ernest Lamy puisqu'ils étaient en train d'installer cette même année une centrale thermique à Mende, dans la Lozère.

La centrale de Bourganeuf alimentait, au moyen d'un fil aérien en cuivre de 850m de long et 8,5mm de diamètre, 106 lampes à incandescence, dont 60 pour l'éclairage des rues, 20 dans la mairie et 7 dans l'église. Ernest Lamy prévoyait d'installer 300 lampes au maximum. La tarification se faisait avec un forfait pour la ville, au compteur pour les particuliers. Ces

derniers payaient également pour la pose des fils dans leur maison, ainsi que pour les appareils et les lampes, qu'ils pouvaient acheter ou louer.

*La Lumière Electrique* décrit cette installation dans sa rubrique « Faits divers » en termes élogieux :

« La place de la mairie surtout présentait un coup d'œil féérique.

L'Hôtel-de-Ville tout entier était entouré de cordons lumineux ; le cadran de l'église resplendissait ; les écussons tricolores aux chiffres R. F. étaient éclatants comme en plein jour.

L'effet produit a étonné et ébloui les assistants, qui ont applaudi et acclamé avec enthousiasme. »<sup>1</sup>

Le *Journal des usines à gaz* fit également part de cette installation, dans un article beaucoup moins élogieux :

« Les journaux quotidiens ont quelque peu vanté la nouvelle station centrale de lumière électrique qui vient d'être solennellement inaugurée à Bourganeuf ; on a parlé de flots de lumière répandus dans la ville, du coup d'œil féérique de la place de la Mairie, des resplendissements qui s'étendaient du cadran de l'église jusqu'aux écussons tricolores. En réalité, l'installation est peu importante et ne mérite pas les éloges si enthousiastes qu'on veut bien lui accorder. Bourganeuf, petite ville de 3.600 habitants, s'éclaire à l'électricité, c'est très bien, mais il n'y a là aucune révolution industrielle, comme semblent le croire certains de nos confrères. »<sup>2</sup>

#### *b) Présentation de René Thury. Invention d'une dynamo multipolaire*

Alfred de Meuron et Henri Cuenod ont d'abord réalisé un nombre important d'installations de centrales électriques à courant continu avec des dynamos Thury en Suisse, brevetées dans ce pays en 1883, avant de le faire à l'étranger et notamment en France à Bourganeuf. Les machines Thury étaient construites par de Alfred de Meuron et Henri Cuénod, qui fondèrent en 1879 à Genève la *Maison Cuénod*. René Thury travailla pour cette entreprise toute sa carrière. Elle changea de nom à de multiples reprises.

---

<sup>1</sup> « Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 20, n°21, 22 mai 1886, p380.

<sup>2</sup> « La station centrale de Bourganeuf », *Journal des usines à gaz*, n°115, 5 juin 1886, p182.

René Thury, né le 7 août 1860, était fils d'un ingénieur, chef d'entreprise et également professeur à l'université de Genève. Il déposa une vingtaine de brevets dans le domaine de l'électrotechnique entre 1883 et 1926. Ses travaux portaient sur les machines électriques, les régulateurs de courant, les systèmes de traction électrique et le transport d'électricité à grande distance sous forme de courant continu.

Il entra en 1874, à l'âge de 14 ans, dans la *Société Genevoise d'Instruments de Physique*, fondée par son père Marc-Anthony Thury et son collègue Auguste de la Rive, pour y réaliser un apprentissage de mécanicien. Il y fut ouvrier de 1876 à 1882. Il fabriqua avec James Nussberger un tricycle à vapeur entre 1877 et 1879.

Il se rendit chez Thomas Edison aux Etats-Unis en 1880, accompagné de deux autres ingénieurs genevois, Théodore Turrettini (1845 – 1916) et Dolfuss. Il eut le privilège de pouvoir librement découvrir les ateliers. L'objectif du voyage, qu'il prolongea, était de voir s'il était possible d'installer le siège européen d'Edison à Genève. Finalement, comme nous l'avons vu il fut installé à Ivry sur Seine.

A son retour, René Thury devint préparateur de laboratoire<sup>1</sup>. Ce fut l'occasion pour lui de construire une machine auto-excitatrice, dont le principe de fonctionnement, décrit dans la première partie, consiste à ce qu'une partie du courant produit par la dynamo soit récupéré pour mettre en marche la machine.

En 1882, il fut recruté par Alfred de Meuron et Henri Cuénod, qui tous deux avaient fondé leur entreprise en 1879. Il devint rapidement l'ingénieur en chef de cette entreprise. En 1883, il déposa son brevet pour une dynamo multipolaire. En 1884, il reçut une médaille d'or à l'Exposition de Turin pour son invention. La même année, il réalisa sa première installation de transport à distance de la force motrice par l'électricité en Suisse. Il inventa également un appareil de mesure capable de réguler la tension du courant automatiquement, que l'entreprise d'Alfred de Meuron et Henri Cuénod breveta.

---

<sup>1</sup> D'abord dans celui des professeurs Soret et Sarrasin, puis dans celui de Raoul Pictet, « le père des machines à glace ». Source : E. Juillard, « L'œuvre de l'ingénieur », *Bulletin de la Suisse Romande*, 1950, p30.

### *c) Le problème du commutateur. Machine multipolaire de René Thury*

#### *1. Cause d'étincelles*

Le problème de la distance de transport de l'énergie électrique, du fait de l'usage de courant à hautes tensions, souleva deux problèmes, l'un associé à la ligne de transport et au coût du cuivre, l'autre aux éléments de construction des machines électriques et plus particulièrement au commutateur des machines à courant continu.

Le commutateur permettait de changer le sens d'un courant d'intensité élevée plusieurs fois par seconde de manière à ce qu'il aille toujours dans le même sens. Sans lui, comme nous l'avons vu dans la première partie, le courant serait resté alternatif et donc encore moins maîtrisable que le courant des piles, dont la nature était connue. Le commutateur générait des étincelles sur les balais de la machine à courant continu, ce qui empêchait de produire de très hautes tensions<sup>1</sup>. Dans son article d'avril 1883 publié dans *La Lumière Electrique*, Frank Géraldy évoqua la question des pertes d'énergie dans une machine électrique. Une citation nous indique l'état de l'industrie électrique à cette date et les projets qui étaient amenés à se réaliser, à savoir le transport de la force motrice électrique à grande distance, rendu possible grâce à l'évaluation des machines électriques :

« Le sujet [évaluation des pertes d'énergie au sein des machines électriques] devient d'ailleurs de plus en plus intéressant à mesure que le rôle des machines s'agrandit ; il va devenir nécessaire de l'étudier de près lorsqu'on va entreprendre la grande application des machines au transport de l'énergie. »<sup>2</sup>

Dès leurs origines, la partie mécanique des machines électriques était relativement facile à améliorer pour les ingénieurs. La difficulté concernait plutôt l'invisible, la partie électrique. En 1883, comme le rappelait Frank Géraldy, on ne pouvait « encore rien dire d'absolument précis »<sup>3</sup> sur les perturbations électriques au sein des machines dynamo-électriques. Ce dernier écrivait en 1883 : « on a coutume de les réunir toutes sous le nom commun et vague de

---

<sup>1</sup> Dr. Louis Bell, "Power transmission for central stations", *Proceedings of the National Electric Light Association*, Fév. - Mars 1893, p153.

<sup>2</sup> Frank Géraldy, « Sur les actions parasites dans les machines dynamo-électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 8, n°16, 24 avril 1883, p510 à 512, p512.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p510.

courants de Foucault. »<sup>1</sup> Frank Géraldy définissait les courants de Foucault ainsi : « (...) Des courants se fermant sur eux-mêmes dans l'intérieur des masses de métal »<sup>2</sup>. Ils tiraient leur nom d'une expérience que le physicien Léon Foucault (1819 – 1868) réalisa, bien qu'il ne fût pas le premier à les avoir identifiés. Frank Géraldy citait notamment les physiciens britanniques Michael Faraday (1791 – 1867) et Sir William Grove (1811 – 1896) et c'est pourquoi il leur préférait le nom de courants « particuliers » à « de Foucault ». Ces courants étaient générés au moment où le commutateur agissait, ce qui rendait les machines dangereuses car elles pouvaient alors exploser facilement<sup>3</sup>.

Un des moyens qui permettait de garder le commutateur tout en luttant contre les étincelles était d'ajouter des pôles magnétiques supplémentaires à la machine, ce qui lui ajoutait de la puissance nécessaire pour lutter contre les courants « particuliers ». Le physicien Paul Janet (1863 – 1937)<sup>4</sup> explique que cette modification fut la plus « notable » pour résoudre le problème des étincelles sur le commutateur<sup>5</sup>. Il situait cette amélioration à 1889, et citait le nom de l'ingénieur Romuald-Victor Picou qui présenta deux moteurs électriques à l'Exposition universelle à Paris en 1889, dont la construction inspira par la suite l'entreprise française *Sautter-Harlé* pour la construction de ses propres machines<sup>6</sup>.

## 2. Une solution en courant continu : les machines multipolaires

*Cuénod, Sautter et Cie en Suisse*

En Suisse, on trouve que René Thury déposa un brevet dès 1883 pour une machine multipolaire, alors qu'elle était censée être nouvelle pour *Sautter-Harlé* en 1889. En plus d'avoir plusieurs pôles magnétiques pour lutter contre les courants « particuliers », sa nouveauté était qu'elle était construite avec du fil épais, de telle sorte qu'il y avait un usage

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> Maurice Hutin et Maurice Leblanc, « Etude sur les courants alternatifs et leur application au transport de la force », *La Lumière Electrique*, 1891, p202.

<sup>4</sup> Fils du philosophe Paul Janet (1823 – 1899).

<sup>5</sup> Paul Janet, « Progrès réalisés dans la grande industrie électrique pendant le dernier demi-siècle », *Le Génie civil. 1880 – 1930. Numéro spécial publié à l'occasion du cinquantenaire de la Fondation du « Génie civil »*, p109.

<sup>6</sup> Plus précisément, la commande des canons, des tourelles cuirassées et des monte-charges de munitions.

magnétique optimal du bâti en métal. Des fils plus fins génèrent un champ électrique moins intense alors que des fils plus épais génèrent un champ électrique plus intense.

Les dynamos Thury avaient été construites selon le principe d'utilisation maximale du magnétisme du fer du bâti de la machine, principe énoncé dès 1881 par Gustave Cabanellas. De plus, comme Gustave Cabanellas, René Thury était en faveur d'un système de distribution en série. Ce dernier avait certainement dû lire le rapport de Gustave Cabanellas lors du Congrès des Electriciens en 1881. Après tout, en tant qu'ingénieur électricien, il a certainement dû se tenir au courant de ce qu'il se disait pendant le Congrès. Peut-être même y a-t-il assisté. Nous savons seulement que les membres du Congrès des Electriciens venus de la Confédération suisse étaient le professeur Hagenbach, de Bâle, Timothée Rothen, adjoint à la Direction des Télégraphes à Berne et F. Weber, professeur à l'École polytechnique de Zurich. René Thury a-t-il eu besoin de l'un de ces intermédiaires pour avoir vent de la communication de Gustave Cabanellas ? Il y avait peut-être eu un compte-rendu dans le *Bulletin de la Société Technique de Suisse Romande*. Une recherche dans la base de données de revues suisses en ligne donne seulement une citation de Gustave Cabanellas dans le *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, Volume 17, année 1881, dont voici un extrait :

« Le rendement est le rapport d'une quantité de travail à une autre qui la fournit ; ici ce sera le quotient du travail absorbé par le moteur au travail dépensé par le générateur, ou

$$D = T / E I = e / E \quad (7)$$

D'après l'équation (6)  $e = T / I$ .

Le travail  $E I$  dépensé par la pile est variable ; il diminue quand le travail absorbé par le moteur augmente.

La démonstration de cette forme du rendement a été donnée par MM. Cabanellas, Verdet, Mascart et Depretz. »<sup>1</sup>

En France, à l'origine, *Sautter-Harlé* était une société d'optique et s'appelait les ateliers *Soleil*. *Soleil* était le nom de famille de l'opticien qui fonda la société d'optique en 1825, sous la direction d'Augustin Fresnel (1788 – 1827). Ce dernier, physicien de renom, inventa une lentille permettant d'augmenter l'intensité de l'éclairage des phares. C'est cette invention

---

<sup>1</sup> Roger Chavannes, « Théorie élémentaire des machines magnéto- et dynamo-électriques », *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, Volume 17, Cahier 86, p601.

que M. Soleil commercialisa depuis ses ateliers de l'avenue Suffren, qu'il fonda en 1825. Louis Sautter les racheta en 1852, pour y construire « le premier grand phare à lentilles et le premier projecteur électrique ». Louis Sautter construisit les premiers phares électriques français, installés au Cap de la Hève, au Nord du Havre, en 1863, éclairé par des machines de la Compagnie l'Alliance évoquées précédemment. En 1865, l'atelier Soleil devint *Louis Sautter et Cie*. En 1867, Louis Sautter construisit le premier projecteur pour le yacht de Napoléon III (1808 – 1873). En 1870, *Louis Sautter et Cie* changea de nouveau de nom et devint *Louis Sautter, Lemonnier et Cie*, spécialisée dans l'éclairage électrique des usines. A partir de 1871, il entreprit la construction des dynamos Gramme et l'installation de systèmes d'éclairage électrique dans les usines. En 1878, « plus de 135 installations de ce genre ont déjà été effectuées par elle dans ces dernières années, à la grande satisfaction des propriétaires de ces usines, et sans que l'on ait jusqu'à ce jour constaté les fâcheux effets que l'on redoutait pour la vue des ouvriers. »<sup>1</sup>

En 1890, *Sautter-Lemonnier* devint *Sautter-Harlé*. L'entreprise était spécialisée dans la construction d'alternateurs, de dynamos, moteurs, appareils de contrôle et de sécurité des moteurs électriques et rhéostats de démarrage<sup>2</sup>. Selon Paul Janet, l'entreprise *Sautter-Harlé* fut l'une des premières en France à construire des génératrices et des moteurs avec des pôles supplémentaires, et il put le constater personnellement. En disant ceci, il nous faut expliquer les liens entre Paul Janet et Jean Rey (1861 – 1935), ingénieur devenu directeur de l'entreprise. Ce dernier, né à Lausanne en Suisse de parents français, de confession protestante comme Louis Sautter, est arrivé dans l'entreprise *Sautter-Harlé* à Paris en avril 1888, alors qu'elle s'appelait *Sautter-Lemonnier*, en tant que secrétaire de Paul Lemonnier. Il monta en grade successivement, passant d'ingénieur attaché à la direction en 1888, à ingénieur en chef en 1896, puis associé gérant en 1904, en association avec Gaston Sautter et Emile Harlé, et enfin administrateur-directeur en 1915. Lorsque Paul Janet quitta ses fonctions à la direction de l'*Ecole Supérieure d'Electricité* et du *Laboratoire Central d'Electricité*, il

---

<sup>1</sup> M. Barlet, « Rapport sur les procédés et les appareils de chauffage et d'éclairage », « Eclairage électrique », *Exposition universelle de 1878*, Paris : Imprimerie nationale, p66.

<sup>2</sup> Sources : Edouard Hospitalier (1902), *L'Electricité à l'Exposition de 1900. Les moteurs électriques et leurs applications*, Paris : Dunod.

Henry de Graffigny (1907), *La Lumière électrique : générateurs d'électricité, dynamos et alternateurs accumulateurs, distribution de la lumière, éclairage à air, éclairage par incandescence*, volume 2 in *Petite bibliothèque d'électricité pratique*, 10 volumes, Paris : Librairie des publications populaires.

nomma pour lui succéder Jean Rey, qui était alors déjà président de la commission administrative de l'école et du laboratoire. Au dire de Paul Janet, ceci les amena à se voir une fois par semaine pendant vingt ans. Paul Janet prononça un discours lors de ses obsèques où il affirma avoir eu une « confiance absolue » en lui lors de leur étroite collaboration.

En 1887, la *Maison Cuénod* dirigée par Henri Cuénod en Suisse devint *Cuénod, Sautter et Cie*<sup>1</sup>. Est-ce à ce moment-là que Louis Sautter, présent à Paris, entra dans le capital de l'entreprise genevoise et fit la rencontre de René Thury et de ses machines multipolaires ?

Les machines Thury étaient quoiqu'il en soit une mise en application directe ou indirecte de plusieurs principes énoncés par Gustave Cabanellas.

#### *d) Marcel Deprez à Bourganeuf*

A la fin de l'année 1888, soit deux ans après l'installation de la centrale Thury, la ville changea de fournisseur d'électricité. La chute d'eau qu'avait choisie Ernest Lamy et ses associés n'était pas assez puissante l'été pour alimenter en électricité les lampes installées en ville, ils devaient parfois utiliser une machine à vapeur pour maintenir le service<sup>2</sup>. En 1887, Marcel Deprez et un autre ingénieur électricien, Maurice Leblanc, créèrent la *Société de transmission de force par l'électricité*, avec l'appui financier des Rothschild. Ils modifièrent l'installation pour qu'elle puisse fournir non seulement de l'éclairage mais aussi de la force motrice électrique. Avant l'installation définitive, Marcel Deprez effectua des essais dans son atelier à Creil<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> En 1891, *Cuénod, Sautter et Cie* fut rachetée par la *Société d'Appareillage Electrique* et devint la *Compagnie de l'Industrie Electrique*. En 1899, la *Compagnie de l'Industrie Electrique* devint la *Compagnie de l'Industrie Electrique. Brevets Thury*. En 1902, la *Compagnie de l'Industrie Electrique. Brevets Thury* fut renommée *Compagnie de l'Industrie Electrique et Mécanique*. En 1910, René Thury devint ingénieur conseil à son propre compte et travailla notamment pour la *Société Alsacienne de Constructions Mécaniques* basée à Belfort, et pour *Dick Kerr et Co. Ltd* basée en Angleterre.

<sup>2</sup> Marcel Deprez, « Sur une application de la transmission électrique de la force faite à Bourganeuf », *La Lumière Electrique*, Volume 33, n°38, 21 septembre 1889, p551 à 557, p552.

<sup>3</sup> Il était accompagné de Beneteau, chef de l'atelier, de Villy, ingénieur électricien, Rabot et Landigeois, ouvriers monteurs.

La chute d'eau utilisée se trouvait dorénavant à 14 km de la ville. Il s'agissait de la cascade de Jarraud, située près du village de Saint Martin le Château. Une turbine construite par la *Société Alsacienne de Constructions Mécaniques* y fut installée. La dynamo Thury fut remplacée par une plus grosse génératrice, installée au pied de la chute, du type Marcel Deprez. Le moteur installé à Bourganeuf avait la même construction que cette génératrice. Il servait à mettre en mouvement deux génératrices Gramme plus petites construites par l'entreprise Bréguet, qui fournissaient directement l'électricité utilisée pour l'éclairage, ainsi que de la force motrice pour une usine de Bourganeuf. L'objectif était d'alimenter 700 lampes à incandescence et fournir 30 chevaux de force motrice électrique pour les industries des environs.

Un ancien agent des lignes télégraphiques logeait au pied de la cascade avec sa famille pour surveiller la centrale. En ville, le moteur électrique et les deux génératrices étaient surveillés par un ancien ouvrier. Marcel Deprez écrivait à propos d'eux : « Ce personnel doit, à la vérité, satisfaire à certaines conditions morales : il doit être choisi avec soin, mais les qualités qu'on est en droit d'exiger de lui ne sont pas nouvelles dans l'industrie, car on les trouve réunies dans le personnel des chemins de fer. »<sup>1</sup>

En 1889, un peu moins d'un an après l'installation, Marcel Deprez fit le bilan dans *La Lumière Electrique* et devant l'Académie des Sciences. Il ne donna aucune indication sur le prix de cette installation, écrivant : « Je n'ai pas à examiner ici le côté économique de la question »<sup>2</sup>, ce qui pouvait paraître suspect pour ses collègues électriciens. Il donna néanmoins des informations sur les salaires du personnel, la ligne de transport du courant (deux fils de 5 mm en bronze « posés sur des poteaux en sapin garnis d'isolaires en porcelaine »<sup>3</sup>), le rendement mécanique à attendre pour la production de lumière lorsque les machines étaient utilisées à plein régime (55%) et l'utilisation spécifique des matériaux, outil souvent utilisé par Gustave Cabanellas, qui était de 6 000 kg en comptant toutes les machines et sans compter la ligne pour une puissance transformée de 100 chevaux.

---

<sup>1</sup> Ibid., p557.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> Ibid., p553.

Marcel Deprez rappela que l'installation de cette nouvelle centrale à Bourgneuf était importante pour lui et ses soutiens financiers puisqu'elle correspondait à la première exploitation commerciale de ses idées énoncées et expérimentées depuis 1881. Ce fut l'occasion pour lui de revenir sur les expériences de Creil, sur les attaques dont il fut l'objet et sur les problèmes techniques qui en furent pour partie la cause : « Je puis dire qu'aujourd'hui tous ces problèmes sont résolus et que la preuve en est dans l'installation de Bourgneuf, qui fonctionne avec un succès complet depuis plusieurs mois. »<sup>1</sup>

C'était certainement la motivation principale dans cette installation, démontrer enfin que son système était économiquement viable, et étant donné le choix du lieu, démontrer qu'il était meilleur que celui proposé par Gustave Cabanellas et repris par René Thury. Pas de chance pour Marcel Deprez, lors de l'inauguration, la génératrice principale au pied de la cascade s'arrêta quatre fois par suite d'un problème sur le commutateur. Elle produisait un courant de plus de 3 000 V, avec à chaque fois des étincelles apparemment suffisantes pour effrayer la foule. Le même problème se produisit sur le moteur électrique installé à Bourgneuf.

## *V. Victoire de la distribution en courant alternatif*

### **1. Courants à haute tension et nécessité du transformateur**

Nous avons vu jusqu'ici que dans les débats sur le transport à grande distance de l'énergie électrique, l'usage de hautes tensions était acquis. Plusieurs solutions furent proposées pour parvenir à les produire. En France, la solution en courant continu de Marcel Deprez domina les discussions et parvint à effacer une autre solution en courant continu proposée par Gustave Cabanellas, qui fut finalement reprise par l'ingénieur suisse René Thury. Il y en eut également une autre, à laquelle nous allons nous intéresser maintenant, qui reposait sur l'usage de courants alternatifs. Il y avait deux raisons pour lesquels finalement la plupart des gestionnaires de centrale préférèrent utiliser ces courants. La première était que les machines en courant alternatif n'avaient pas de commutateur, élément des dynamos qui provoquaient

---

<sup>1</sup> Ibid., p552.

des étincelles quand la tension du courant était trop élevée. Il était donc possible d'utiliser des tensions plus élevées qu'avec le courant continu, ce qui réduisait énormément le coût en cuivre des lignes. Les étincelles au niveau du commutateur diminuaient le rendement des machines à courant continu, ce qui rendait cet élément technique (au sens de Gilbert Simondon) inadapté. Les ingénieurs électriciens, après avoir mené de longues recherches sur la manière de construire des machines économiques génératrices de courant continu, cherchèrent finalement à se débarrasser de l'élément par lequel c'était possible.

La seconde motivation derrière le choix du courant alternatif pour le transport à longue distance était que les transformateurs en courants alternatifs avaient un meilleur rendement que les transformateurs de courants continus.

#### *a) Lucien Gaulard et l'élément clé, le transformateur en courant alternatif. Guerre des courants*

Une solution plus radicale que l'ajout de pôles magnétiques pour se passer des étincelles au commutateur était de s'en débarrasser et de conserver les courants dans leur forme originalement produite par les machines, en courant alternatif. Cela permettait de pouvoir produire de plus hautes tensions et de contourner plus économiquement la contrainte de la distance de transport. Pour ramener le courant à une tension utilisable, les savants français Lucien Gaulard et anglais John Dixon Gibbs inventèrent en 1883 les transformateurs fonctionnant avec du courant alternatif. Egalement qualifiés de générateurs secondaires, ils permettaient de réguler la dépense en énergie d'un système de distribution électrique. Lucien Gaulard écrivait à ce propos : « (...) pour qu'un système de distribution soit complet, il est vrai que le travail dépensé sur la génératrice varie avec le travail consommé sur la ligne et que ces deux travaux se règlent, pour ainsi dire, automatiquement. »<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Lucien Gaulard, « Générateur secondaire modifié. Régulateur de courants », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1, 1884, p409.

### 1. Acceptation de Gustave Cabanellas et de son équipe

Le robinet électrique que Gustave Cabanellas présenta en 1881 était déjà un transformateur. Il avait d'ailleurs envisagé qu'il puisse fonctionner avec des courants alternatifs<sup>1</sup>. Comme il n'était pas en faveur d'une seule machine produisant de très hautes tensions mais de plusieurs machines productrices de tension moyenne, dont la somme s'additionnait pour donner une tension élevée, il n'avait pas besoin de se passer du commutateur et d'avoir recours au courant alternatif.

En 1889, Romuald-Victor Picou fit la comparaison suivante entre les deux types de transformateurs, à courant continu et alternatif :

« Les deux systèmes de transformateurs présentent des avantages et des inconvénients qui leur sont propres. Les transformateurs alternatifs ont cet avantage d'être des organes fixes, ne nécessitant aucune surveillance, et qui peuvent s'établir n'importe où, hors de portée de la main. Ils ont un rendement très élevé, même lorsqu'ils travaillent à faible charge, et ne sont susceptibles d'aucun dérangement accidentel une fois établis. Les machines alternatives qui les alimentent sont également d'une surveillance et d'un emploi faciles. (...)

Les transformateurs à courant continus sont relativement plus coûteux. Ils exigent une installation plus importante et une surveillance continuelle et sont sujets à une usure plus rapide ; leur rendement est moins élevé. »<sup>2</sup>

D'après un article de l'*Electrical Review*, revue anglaise ayant rendu compte de leur première expérience d'éclairage dans le métro londonien en 1883, le système de Gaulard et Gibbs permettait d'obtenir un rendement de 70%, calculé comme étant égal au rapport entre la puissance électrique fournie par la génératrice en bout de ligne servant à de l'éclairage, et la puissance mécanique fournie par la machine à vapeur à la génératrice de courant au départ<sup>3</sup>. Le rendement du transformateur était de 90%. Le courant était produit par une machine Siemens à la tension de 1500V. La distance de transport était de 7 miles, soit 11km. Trois

---

<sup>1</sup> Gustave Cabanellas, « Mémoire sur les principes théoriques et conditions techniques de l'application de l'électricité au transport et à la distribution de l'énergie sous les principales formes chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique », *Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils*, Volume 47, 1887, 1<sup>er</sup> semestre, p144.

<sup>2</sup> Romuald-Victor Picou, « Les transformateurs », *La Lumière Electrique*, 1889, p392.

<sup>3</sup> Lucien Gaulard, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°52, 29 décembre 1883, p573.

sous-stations étaient installées entre le départ et l'arrivée du courant, avec chacune un transformateur.

Le 6 février 1884, Lucien Gaulard présenta son transformateur devant la *Société Internationale des Electriciens*, dont il était alors membre. Il faisait partie de la deuxième section de la *Société Internationale des Electriciens* : « Machines dynamo-électriques – Transport et Distribution de l'Energie », de même qu'Henri Tresca, qui en était le président, Edouard Hospitalier, qui en était le secrétaire, et Gustave Cabanellas, qui tenait à ce que Lucien Gaulard puisse présenter son invention. François Caron et Fabienne Cardot rappelle que la *Société Internationale des Electriciens* n'était pas toute acquise aux principes de Marcel Deprez, qui n'en était d'ailleurs pas membre : « Tresca, qui avait rédigé le rapport sur l'expérience de Deprez à la gare du Nord, n'avait pas été convaincu par cet essai. En qualité de président de la 2e section (machines dynamo-électriques - transport et distribution de l'énergie), il bouleverse l'ordre du jour de la première séance de la Société (6 février 1884), et, profitant de la présence à Paris de Lucien Gaulard ainsi que de sa qualité de membre, il lui donne la parole. »<sup>1</sup>

Rappelons qu'Henri Tresca n'était pas convaincu par les résultats obtenus par Marcel Deprez, qu'il avait eu l'occasion d'évaluer personnellement, et qu'Edouard Hospitalier et Gustave Cabanellas avaient un intérêt commun, faire échouer le projet financier de Cornelius Herz qui avait racheté leurs brevets. Est-ce uniquement pour cela que le 5 novembre 1884, Gustave Cabanellas félicita Lucien Gaulard pour ses résultats obtenus à Turin en septembre 1884, et pour la récompense de 10 000 francs qui lui y revint ?

## 2. Rejet de Lucien Gaulard par Marcel Deprez

### a) Critique de Frank Géraldy. Propriété industrielle

Après la démonstration expérimentale de Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs en Angleterre, Frank Géraldy rédigea un article très critique dans *La Lumière Electrique* dans lequel il insistait pour dire que l'invention n'était pas nouvelle et que le transformateur des

---

<sup>1</sup> François Caron et Fabienne Cardot, *ibid.*, p317.

deux savants reposait sur des principes déjà connus, notamment ceux à la base du fonctionnement d'une bobine de Ruhmkorff<sup>1</sup>.

Heinrich Ruhmkorff (1803 – 1877) était un constructeur d'instruments scientifiques, d'optique et électriques, reconnu en France et à l'étranger, né en 1803 à Hanovre, en Allemagne et installé à Paris. Il commença sa carrière comme apprenti dans divers ateliers de mécanique de précision avant de venir à Paris à 18 ans. Il s'y installa définitivement à 22 ans après un bref détour par Londres. Il y travailla comme ouvrier chez l'opticien Fortin, puis chez Charles Chevalier, inventeur du microscope achromatique. Ruhmkorff commença ainsi sa carrière dans le domaine de l'optique, comme Michael Faraday (1791 – 1867), un autre pionnier de l'électricité que nous avons cité pour avoir découvert le phénomène d'induction.

Après l'optique, Heinrich Ruhmkorff s'intéressa à la thermoélectricité, qui fait le lien entre la différence de température de deux matériaux et l'électricité que cela génère. Il perfectionna un appareil thermoélectrique conçu par le physicien italien Macedonio Melloni (1798 – 1854), ce qui fut sa première réalisation reconnue. Suite à cela, il créa son propre atelier de construction d'instruments scientifiques en 1838.

Lors de l'Exposition nationale en 1844 à Paris, il présenta un appareil thermoélectrique pour lequel il obtint une médaille d'argent. Cinq ans plus tard lors du même évènement, il remporta une autre médaille pour la construction d'un électro-aimant de deux dimensions différentes, un petit pour les cours de physique et un plus grand pour les plus grandes expériences, dont il fit la présentation à l'Académie des Sciences en 1846.

Il inventa sa bobine d'induction en 1851. Son objectif était de trouver un usage industriel au courant électrique produit par la pile de Volta. Sa bobine produisait du courant alternatif à haute tension, pouvant générer des étincelles entre deux conducteurs éloignés l'un de l'autre, le tout à partir d'une pile<sup>2</sup>. Ces étincelles étaient utiles à la fois à la recherche scientifique, et

---

<sup>1</sup> Frank Géraldy, « Sur les Essais du Système Gaulard et Gibbs », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°50, 15 décembre 1883, p496.

<sup>2</sup> « Rapport fait par M. Edmond Becquerel, au nom du comité des arts économiques, sur un appareil électromagnétique présenté par M. Ruhmkorff, ingénieur mécanicien, *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1855, 2<sup>ème</sup> semestre, p765.

au déclenchement d'explosions de poudre dans les mines ou pour le démarrage des moteurs à gaz. Associée à des tubes fluorescents construits par Edmond Becquerel et Geysler, la bobine de Ruhmkorff était également utilisée dans les années 1860 pour l'éclairage des mines ou des navires de haute mer.

Le fonctionnement d'une bobine de Ruhmkorff était le suivant : contrairement à l'électro-aimant, qui correspond à une masse de fer entouré d'un fil conducteur traversé par un courant continu, une bobine d'induction était entourée de deux fils, formant deux circuits distincts et isolés l'un de l'autre. Le courant continu qui circule dans le premier fil, qualifié de courant inducteur, servait à aimanter la masse de fer. Cette aimantation induisait un courant dans le deuxième fil. Lorsque le premier courant était interrompu, la masse de fer se désaimantait. Cette désaimantation produisait également un courant dans le deuxième fil, dont le sens était inverse au précédent. Le premier courant était interrompu un grand nombre de fois par seconde grâce à un interrupteur, ce qui avait pour effet d'aimanter et de désaimanter plusieurs fois par seconde la masse de fer, et de produire un courant alternatif dans le deuxième fil. Le premier fil était court et épais et le second fil fin et long, la bobine transformant ainsi un courant de basse tension en courant de haute tension. C'est ainsi que fonctionnait une bobine d'induction. Pour augmenter la taille des étincelles produites aux bornes du second fil, Ruhmkorff eut l'idée de relier le premier fil à un condensateur, ce qui augmentait la tension du courant dans le second fil et la taille des étincelles.

La différence entre une bobine de Ruhmkorff et un transformateur était que la première était alimentée en courant continu par une pile, alors que le transformateur était alimenté en courant alternatif par une machine génératrice. Il n'y avait donc plus besoin d'interrupteur. Sinon le principe de fonctionnement était bien le même. Dès 1879, Marcel Deprez déposa un brevet sur la réversibilité de cette bobine, c'est-à-dire sur une bobine capable de transformer un courant de haute tension en courant de basse tension. Il suffisait pour cela d'utiliser un premier fil fin et long, et un second fil court et épais. Dans la réponse que donna Lucien Gaulard à l'accusation de Frank Géraldy et qui fut publiée dans la rubrique « Correspondance » de *La Lumière Electrique*, il précisa qu'il connaissait le brevet de Marcel Deprez, mais considérait que cela ne valait pas le dépôt d'un brevet car le principe de

réversibilité de la bobine de Ruhmkorff était connu de la plupart des savants électriciens. Notons que Frank Géraldy semblait moins dérangé par le problème d'imitation lorsque cela venait de Marcel Deprez.

Comme lui, et comme beaucoup d'autres inventeurs, Lucien Gaulard s'était bien inspiré de l'existant. Nous verrons plus loin que Nikola Tesla avait également repris les travaux de Ruhmkorff. Lucien Gaulard expliquait que ce qui le mena à son invention était comment rendre la bobine d'induction de Ruhmkorff utilisable dans le transport industriel d'électricité à grande distance. Dans une lettre à *La Lumière Electrique*, il précisait :

« L'idée d'obtenir d'un courant de petite intensité un courant alternatif d'une force supérieure, au moyen d'un appareil basé sur le même principe que la bobine de Ruhmkorff, mais servant à un usage contraire, est si simple et si naturelle, qu'il n'est pas difficile de trouver dans le passé cette idée plusieurs fois émise et soumise à des expériences. Elle pourrait trouver une application pratique dans la distribution de l'énergie par le courant électrique, et surtout dans la lumière électrique. Et, quoique cette idée fût aussi simple et naturelle et fût proposée, et même expérimentée par plusieurs électriciens, les premiers, MM. Gaulard et Gibbs, en firent l'objet d'un brevet spécial. »<sup>1</sup>

*b) Critique de Marcel Deprez. Problème du rendement*

Dans l'installation de Lucien Gaulard à l'Exposition de Turin, une génératrice produisait un courant de 2000V, dans un fil télégraphique de 4mm de diamètre, qui éclairait des lampes à incandescence et des lampes à arc installées dans la gare de Lanzo située à 10km de Turin. Quatre transformateurs étaient installés dans la gare et ramenait le courant à une tension utilisable pour les lampes. En octobre 1884, le professeur G. Colombo rédigea un compte-rendu de l'installation dans *La Lumière Electrique*. Cornélius Herz et Marcel Deprez le firent précéder d'un article où ce dernier écrivait :

« M. le professeur Colombo a adressé un article que l'on trouvera plus loin et qui est relatif aux résultats des expériences faites à l'Exposition de Turin sur l'application à l'éclairage électrique des générateurs secondaires de MM. Gaulard et Gibbs. Cet article m'a été communiqué par le directeur du journal, M. le Dr Cornelius Herz, qui en raison de l'autorité scientifique de M. le professeur Colombo,

---

<sup>1</sup> Lettre de MM. Gaulard et Gibbs, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 18, n°40, 3 octobre 1885, p44.

m'a engagé à lire attentivement son mémoire et à exposer dans les colonnes de ce journal mon opinion personnelle sur les générateurs Gaulard et Gibbs et sur la nature des services qu'ils peuvent rendre. »<sup>1</sup>

Dans cet article, Marcel Deprez descendait en flèche la réalisation de Lucien Gaulard. Il en fit une critique en quatre points : nouveauté et valeur d'un point de vue scientifique, et nouveauté et valeur d'un point de vue industriel.

En ce qui concerne la nouveauté industrielle, celle-ci s'évaluait à partir des brevets. Or selon Marcel Deprez, l'obtention d'un brevet ne garantissait pas la nouveauté. C'est donc la définition même du brevet qu'il remettait en cause. Dans une autre lettre adressée à *La Lumière Electrique*, Lucien Gaulard expliqua que de l'autre côté de la manche aussi, on lui avait trouvé plein de véritables inventeurs. Il commentait cela ainsi : « La question de déterminer, d'une façon précise, où commence et où finit le droit à la propriété industrielle d'une invention, est chose difficile, et toujours sujette à des contestations. »<sup>2</sup>

Concernant la valeur industrielle, Marcel Deprez la rattachait à celle du rendement, qu'il trouvait incertaine, et à l'utilisation du dispositif dans la pratique. Apparemment la régulation du courant n'était pas encore tout à fait au point car lorsqu'une lampe s'éteignait, cela pouvait troubler l'éclairage des lampes les plus proches. Lucien Gaulard avait pourtant présenté un régulateur automatique en même temps que son installation. G. Colombo de commenter : « (...) mais les appareils automatiques font toujours peur, surtout quand ils ne sont pas sous la surveillance directe d'un personnel capable, et se trouvent au contraire dans les mains d'un consommateur inexpérimenté ou insouciant. »<sup>3</sup>

En ce qui concerne la nouveauté scientifique, Marcel Deprez citait lui aussi les travaux antérieurs d'Heinrich Ruhmkorff, ses propres travaux ainsi que ceux d'un certain Bichat, également cité dans une des lettres de Frank Géraldy. Tous consistaient à utiliser la réversibilité de la bobine de Ruhmkorff. En ce qui concerne la valeur scientifique, Marcel

---

<sup>1</sup> Marcel Deprez, « Sur les générateurs secondaires de MM. Gaulard et Gibbs », *La Lumière Electrique*, Volume 14, n°41, 11 octobre 1884, p41.

<sup>2</sup> Lettre de Lucien Gaulard, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 18, n°40, 3 octobre 1885, p44.

<sup>3</sup> G. Colombo, « Le système Gaulard et Gibbs à l'Exposition de Turin », *La Lumière Electrique*, Volume 14, n°41, 11 octobre 1884, p46.

Deprez la mesura étrangement à partir du rendement, celui du transformateur et celui du système de transport dans son intégralité, et à partir de la quantité de cuivre requise dans le transformateur. Cela peut s'expliquer par les propos de Lucien Gaulard suivants, où il expliquait que de manière générale, une découverte scientifique dont le rendement était par la suite amélioré constituait, pour celui qui était l'auteur de cette amélioration, une nouvelle découverte scientifique. Dans son cas, *l'Electrical Review* rappela en 1883 qu'un certain Fuller avait présenté un transformateur électrique dès 1879. Lucien Gaulard y répondait ainsi :

« En présence de cette communication, nous devons nous incliner et nous contenter de rechercher les conditions théoriques et pratiques d'établissement d'un appareil d'induction susceptible de donner un rendement de transformation suffisamment économique pour permettre une utilisation pratique de cette idée abandonnée par suite des résultats insuffisants obtenus, et c'est après un travail opiniâtre et de très grands sacrifices, envers et contre toutes les appréciations de tous les hommes compétents sans exception, qu'avec une persévérance à laquelle M. le professeur Forbes a rendu un complet hommage dans la lecture qu'il fit à la Société des Arts, le 16 février dernier [1885], nous sommes arrivés à doter l'industrie d'un appareil simple et pratique, susceptible de transformer ad libitum les deux facteurs de l'énergie d'un courant alternatif avec un rendement de 95%. »<sup>1</sup>

D'après G. Colombo, le transformateur coûtait au total 17 francs par lampe, ce qui était considéré par Marcel Deprez comme cher. Pour se justifier, Lucien Gaulard lui répondit que son transformateur pesait 20kg de cuivre, soit 60 francs de cuivre, et qu'il pouvait allumer jusqu'à 20 lampes, soit 3 francs par lampe en ce qui concerne uniquement le cuivre.

Concernant le rendement du transformateur, G. Colombo calcula qu'il était à Turin de 89% alors que pour Marcel Deprez, il ne pouvait pas dépasser 50%. Le savant britannique John Hopkinson, qui avait travaillé sur les expériences de Marcel Deprez, rédigea un rapport sur les expériences de Lucien Gaulard et John Gibbs à Londres, où il fit là aussi des mesures expérimentales de rendement. Ce rapport fut reproduit dans *La Lumière Electrique*. Jules Sarcia, collègue de Marcel Deprez, critiqua ses calculs. Et en effet, la méthode de calcul de John Hopkinson, qui consistait à utiliser des appareils de mesure utilisés pour les courants continus, ne prenait pas en compte les propriétés particulières du courant alternatif. Le véritable travail théorique de mesure de rendement du système de Gaulard et Gibbs fut fait

---

<sup>1</sup> Lettre de Lucien Gaulard, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 18, n°40, 3 octobre 1885, p44.

en 1885 par le scientifique italien Galileo Ferraris, spécialiste du courant alternatif. Il estimait qu'avant sa propre étude théorique et pratique exposée dans ce mémoire, les travaux sur le transformateur avaient abouti à la détermination non pas du coefficient de rendement de l'appareil mais à « une approximation suffisante au point de vue industriel »<sup>1</sup> de celui-ci. Galileo Ferraris partit de ces méthodes approximatives pour mieux les dépasser et développer sa propre méthode, qui se distinguait des précédentes simplement par l'outil de mesure employé. Jusqu'alors, les appareils de mesure utilisés étaient à la fois des galvanomètres, utilisés pour mesurer l'intensité du courant, et des électrodynamomètres, utilisés pour mesurer des différences de potentiel. Galileo Ferraris lui utilisait un calorimètre, lui permettant de mesurer directement la chaleur dégagée en un point du circuit. Selon ses termes : « La particularité essentielle de la nouvelle méthode est qu'il n'y est fait usage d'aucun autre appareil de mesure que le calorimètre. »<sup>2</sup>

En utilisant cet instrument de mesure, Galileo Ferraris cherchait à contourner les défauts que présentaient l'électromètre et l'électrodynamomètre pour la mesure des courants alternatifs. Nous retrouvons ici les difficultés déjà évoquées liées à la mesure de l'électricité.

Dans la méthode utilisée par John Hopkinson, le galvanomètre servait à mesurer d'une part l'intensité du courant secondaire, qui, d'après la loi de Joule, multipliée à la résistance donne la quantité de chaleur dégagée dans le circuit secondaire, notée  $q$ . D'autre part, il servait à mesurer l'intensité du courant primaire qui, multipliée à la résistance du transformateur, donnait la quantité de chaleur dégagée dans le circuit primaire, notée  $Q$ .

Le rapport  $q/Q$  donne le coefficient  $m$ , considéré jusqu'aux travaux de Galileo Ferraris comme le coefficient de rendement total du générateur secondaire. Ce dernier ne rejetait pas totalement ces valeurs puisqu'elles lui permettaient d'obtenir des valeurs numériques pour certaines grandeurs, nécessaires pour la détermination du vrai coefficient de rendement  $\mu$  grâce à la formule ci-dessous, que nous ne détaillerons pas :

---

<sup>1</sup> Galileo Ferraris, « Recherches Théoriques et Expérimentales sur le Générateur Secondaire », *La Lumière Electrique*, n° 24, 20 juin 1885, p551.

<sup>2</sup> Ibid., p555.

$$\mu = m / \sqrt{1 - (r' * m / C)^2}$$

Avec sa méthode, Galileo Ferraris trouva des valeurs de rendement encore plus grandes, proches de l'unité. Dans le rapport de la « Commémoration du cinquantenaire des premières réalisations de transmission d'énergie par l'électricité » réalisé en 1935 par la *Société Française des Electriciens* (anciennement *Société Internationale des Electriciens*), on trouve le commentaire rétrospectif suivant sur le rendement du système « Gaulard et Gibbs » et l'état d'esprit de l'époque :

« L'excellence du rendement obtenu suscita quelque peu l'incrédulité des techniciens de l'époque ; les Français ne furent pas les plus bienveillants. A cette époque, l'attention du monde de l'électricité était fixée, surtout en France, sur les applications du courant continu à haute tension. »

Le rapporteur des expériences de Lucien Gaulard à l'Académie des Sciences, Henri Tresca, nota d'ailleurs qu'il ne souhaitait pas divulguer le chiffre du rendement du transformateur de Lucien Gaulard afin de préserver les membres du jury de la spéculation.

#### *c) Comparaison avec le système de Thomas Edison*

En plus d'émettre des doutes sur l'usage de courants alternatifs dans des longs câbles souterrains, Marcel Deprez terminait sa charge contre le système de Gaulard et Gibbs avec un argument qu'utilisait également Thomas Edison : la dangerosité des courants alternatifs. Il se trouve que G. Colombo comparait justement la solution de Lucien Gaulard à celle de Thomas Edison. Selon lui, les deux étaient complémentaires. Celle de Thomas Edison concernait la distribution du courant en ville, par quartier. Celle de Lucien Gaulard permettait d'aller chercher le courant loin des villes, là où l'énergie primaire se trouvait. Or c'est ce problème là que Marcel Deprez tentait de résoudre au moyen du courant continu. D'où son mécontentement devant la solution de Lucien Gaulard. Ce dernier termina sa réponse à Marcel Deprez sur une touche nationaliste, comme pour prouver sa légitimité et amener ses collègues à faire le bon choix pour le pays, celui de le soutenir :

« Quoiqu'il en soit, c'est avec une légitime satisfaction, qu'au milieu de la merveilleuse manifestation du développement de l'industrie italienne, dont Turin est aujourd'hui le théâtre, j'ai maintenu le drapeau de la France à la tête des progrès réalisés par les applications de la science à l'industrie. »<sup>1</sup>

## *b) Les moteurs à courant alternatif à champ tournant de Nikola Tesla*

### *1. Le besoin de moteurs à courants alternatifs*

Comme Frank Géraldy, Marcel Deprez mit en avant dans sa critique du système de Gaulard et Gibbs le fait que les courants alternatifs ne pouvaient pas encore être utilisés pour actionner des moteurs, contrairement au courant continu, puisqu'il n'y avait pas encore de moteurs à courant alternatif répandus dans l'industrie. Lucien Gaulard avait répondu à Frank Géraldy qu'il arrivait à faire tourner un moteur de sa propre construction avec du courant alternatif produit à 14km du moteur<sup>2</sup>. Frank Géraldy doutait que le moteur puisse être utilisé dans la pratique. Et en effet, lors de l'Exposition de Turin, en Italie, qui eut lieu en septembre 1884, il n'y eut pas d'application de force motrice en démonstration. Il fallut attendre 1888 pour que Nikola Tesla présente devant *l'American Institute of Electrical Engineers* son système complet de production, transport et distribution en courants alternatifs et son moteur à champ tournant.

### *2. Fonctionnement des moteurs à champ tournant*

Dans les moteurs à champ tournant, les électro-aimants étaient alimentés par des courants alternatifs polyphasés venant de la ligne de distribution, et produisaient un champ magnétique tournant. Ce champ magnétique induisait des courants dans l'armature, ou rotor du moteur, ce qui le mettait en rotation, sans qu'il y ait besoin d'avoir recours à un collecteur ou commutateur.

Le sens d'un courant alternatif variant de manière cyclique, des courants alternatifs polyphasés sont des courants en quelque sorte décalés l'un par rapport à l'autre. Les

---

<sup>1</sup> Lucien Gaulard, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 14, n°43, 25 octobre 1884, p156.

<sup>2</sup> Lucien Gaulard, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°52, 29 décembre 1883, p573.

courants diphasés sont décalés d'un quart de période l'un par rapport à l'autre, et les courants triphasés sont décalés d'un tiers de période. C'est cette différence de phase qui génère le champ magnétique tournant et qui permettait de faire tourner le rotor du moteur. L'intérêt de ces moteurs était que le commutateur devenait inutile, les électro-aimants et l'armature étant indépendants l'un de l'autre. Ils n'étaient reliés par aucun élément technique comme c'était le cas dans tous les autres types de moteurs.

L'armature pouvait soit être une cage d'écureuil en fer, lorsque les moteurs avaient une faible puissance allant jusqu'à 3 ou 4 kW, soit, pour les puissances plus élevées, deux ou trois bobines fermées sur elles-mêmes. Le nom cage d'écureuil venait sans doute d'une analogie dans la forme avec la roue en bois des premiers monte-charge, datant du Moyen-âge et qualifiés de « cage d'écureuil ».

Selon que le moteur fonctionnait respectivement avec des courants di- ou triphasés, il était alimenté par deux ou trois courants alternatifs, et donc il fallait utiliser deux ou trois fils différents. Ceci était un obstacle à l'emploi du système de Nikola Tesla car cela entraînait une dépense en cuivre un peu trop lourde. Pour la réduire, il tenta de produire les différences de phase au plus près du moteur, voire même dans le moteur. Pour produire le retard de phase lorsque le moteur était diphasé, Nikola Tesla proposait de relier l'un des circuits du moteur à la ligne de distribution, l'autre au circuit secondaire d'un transformateur, ou bien d'insérer des résistances de valeur différente dans chacun des deux circuits du moteur. Il proposa également d'utiliser un fil très fin dans un circuit, et un fil un peu moins fin dans l'autre, ou d'utiliser deux matériaux différents : un fil de cuivre et un fil de maillechort<sup>1</sup>. Les fils ne devaient être ni trop gros car alors les autres éléments auraient eu des dimensions trop importantes, ni trop fins sinon la tension aurait été trop élevée et il aurait fallu faire des frais supplémentaires pour leur isolation.

---

<sup>1</sup> E. R., « Moteurs Tesla alimentés par des circuits alternatifs à double fil avec une période unique », *La Lumière Electrique*, Volume 51, n°6, 10 février 1894, p281.

Maurice Leblanc et son collaborateur Maurice Hutin proposèrent, en 1891, une autre solution : l'emploi de condensateurs<sup>1</sup>. William Stanley, dans son mémoire « Alternate Current Motors » paru dans les comptes rendus de la *National Electric Light Association* en 1892, connaissait la découverte de Maurice Leblanc et précisait que son collègue, Kelly, avait fait de même aux Etats-Unis<sup>2</sup>. En 1895, ils déposèrent un brevet aux Etats-Unis pour un moteur où le condensateur était remplacé par une batterie d'accumulateurs. Dans le cas d'un moteur diphasé, un courant alternatif monophasé passait dans deux batteries différentes avant d'aller jusqu'au moteur, les batteries n'avaient pas le même nombre d'éléments de manière à pouvoir produire la différence de phase<sup>3</sup>.

### c) La recherche de financements de Nikola Tesla

#### 1. Nikola Tesla en France (1882 – 1884)

Nikola Tesla commença sa carrière au sein de l'entreprise gouvernementale du télégraphe en Hongrie. C'est là qu'il rencontra Tivadar Puskas (1844 – 1893), scientifique hongrois pionnier de la téléphonie qui aida à l'installation des entreprises Edison en France et les dirigea pendant quatre ans. Ce dernier lui y offrit un emploi, ce qui amena Nikola Tesla à déménager alors sur le boulevard Saint-Marcel à Paris<sup>4</sup>.

L'idée du moteur à champ tournant lui est venue alors qu'il était encore en Hongrie, lorsqu'il constata que dans une machine électrique le courant était naturellement produit sous forme de courant alternatif et que le commutateur était un artifice qui générait trop de pertes d'énergie. Pour éviter cela, que ce soit dans la génératrice ou dans le moteur, Nikola Tesla préférait utiliser directement les courants alternatifs. Il commença à travailler sur les moteurs à courants alternatifs diphasés dès 1882, et construisit le premier moteur à champ tournant en France en 1883, dans les ateliers de Strasbourg de l'entreprise de Thomas Edison. En 1899, le physicien Albert Turpain (1867 – 1952), professeur à l'université de Poitiers, rédigea un

---

<sup>1</sup> A. Hess, « Les inventions, recherches et écrits de Nikola Tesla, par T. C. Martin », *La Lumière Electrique*, Volume 53, n°27, 7 juillet 1894, p46.

<sup>2</sup> William Stanley, « Alternate Current Motors », *National Electric Light Association*, p171.

<sup>3</sup> Source : <https://www.google.com/patents/US571478>

<sup>4</sup> Dan Mrkich (2004), *Nikola Tesla. The European Years*, Nikola Tesla Museum.

article rétrospectif sur les découvertes de Nikola Tesla dans la revue *La Nature*. A noter que ce dernier était encore en vie à cette date :

« Au cours de sa deuxième année d'études à l'Université de Gratz on fit fonctionner devant lui une dynamo qui présentait de nombreuses étincelles aux balais. « *N'est-il pas possible de supprimer cet inconvénient ?* » demanda-t-il. « *C'est aussi chimérique que la solution du mouvement perpétuel* » lui fut-il répondu. C'est en 1882, étant à Budapest, poursuivant ce problème, qu'il découvrit les champs magnétiques tournants et par là, l'entretien d'un moteur dépourvu d'étincelles aux balais. Il construisit, à l'atelier, avec des pièces apportées de Paris, un petit moteur asynchrone, et c'est à Strasbourg qu'il vit, pour la première fois, fonctionner son moteur ; il chercha le moyen d'industrialiser sa découverte, d'abord à Paris, puis à Strasbourg. Mais, comprenant qu'il ne parviendrait pas à intéresser les milieux techniques à son invention, Tesla s'expatria aux Etats-Unis. »<sup>1</sup>

Nikola Tesla lui-même, dans un récit rétrospectif sur ses années en France, mit en avant cet argument pour expliquer son départ vers les Etats-Unis. Ci-dessous les années 1882 – 1884 en France décrites par le savant lui-même :

« For a while I gave myself up entirely to the intense enjoyment of picturing machines and devising new forms. It was a mental state of happiness about as complete as I have ever known in life. Ideas came in an uninterrupted stream and the only difficulty I had was to hold them fast. The pieces of apparatus I conceived were to me absolutely real and tangible in every detail, even to the minute marks and signs of wear. I delighted in imagining the motors constantly running, for in this way they presented to mind's eye a more fascinating sight. When natural inclination develops into a passionate desire, one advances towards his goal in seven-league boots. In less than two months I evolved virtually all the types of motors and modifications of the system which are now identified with my name. It was, perhaps, providential that the necessities of existence commanded a temporary halt to this consuming activity of the mind. I came to Budapest prompted by a premature report concerning the telephone enterprise and, as irony of fate willed it, I had to accept a position as draftsman in the Central Telegraph Office of the Hungarian Government at a salary which I deem it my privilege not to disclose! Fortunately, I soon won the interest of the Inspector-in-Chief and was thereafter employed on calculations, designs and estimates in connection with new installations, until the Telephone Exchange was started, when I took charge of the same. The knowledge and practical experience I gained in the course of this work was most valuable and the employment gave me ample opportunities for the exercise of my inventive faculties. I made several improvements in the Central

---

<sup>1</sup> Albert Turpain, « Sur les chemins de la découverte. L'œuvre de Nicolas Tesla », *La Nature*, 1939, 1<sup>er</sup> semestre, p163.

Station apparatus and perfected a telephone repeater or amplifier which was never patented or publicly described but would be creditable to me even today. In recognition of my efficient assistance the organizer of the undertaking, Mr. Puskas, upon disposing of his business in Budapest, offered me a position in Paris which I gladly accepted.

I never can forget the deep impression that magic city produced on my mind. For several days after my arrival I roamed thru the streets in utter bewilderment of the new spectacle. The attractions were many and irresistible, but, alas, the income was spent as soon as received. When Mr. Puskas asked me how I was getting along in the new sphere, I described the situation accurately in the statement that "the last twenty-nine days of the month are the toughest!" I led a rather strenuous life in what would now be termed "Rooseveltian fashion." Every morning, regardless of weather, I would go from the Boulevard St. Marcel, where I resided, to a bathing house on the Seine, plunge into the water, loop the circuit twenty-seven times and then walk an hour to reach Ivry, where the Company's factory was located. There I would have a woodchopper's breakfast at half-past seven o'clock and then eagerly await the lunch hour, in the meanwhile cracking hard nuts for the Manager of the Works, Mr. Charles Batchellor, who was an intimate friend and assistant of Edison. Here I was thrown in contact with a few Americans who fairly fell in love with me because of my proficiency in billiards. To these men I explained my invention and one of them, Mr. D. Cunningham, Foreman of the Mechanical Department, offered to form a stock company. The proposal seemed to me comical in the extreme. I did not have the faintest conception of what that meant except that it was an American way of doing things. Nothing came of it, however, and during the next few months I had to travel from one to another place in France and Germany to cure the ills of the power plants. On my return to Paris I submitted to one of the administrators of the Company, Mr. Rau, a plan for improving their dynamos and was given an opportunity. My success was complete and the delighted directors accorded me the privilege of developing automatic regulators which were much desired. Shortly after there was some trouble with the lighting plant which had been installed at the new railroad station in Strassburg, Alsace. The wiring was defective and on the occasion of the opening ceremonies a large part of a wall was blown out thru a short-circuit right in the presence of old Emperor William I. The German Government refused to take the plant and the French Company was facing a serious loss. On account of my knowledge of the German language and past experience, I was entrusted with the difficult task of straightening out matters and early in 1883 I went to Strassburg on that mission.

Some of the incidents in that city have left an indelible record on my memory. By a curious coincidence, a number of men who subsequently achieved fame, lived there about that time. In later life I used to say, "There were bacteria of greatness in that old town. Others caught the disease but I escaped!" The practical work, correspondence, and conferences with officials kept me preoccupied

day and night, but, as soon as I was able to manage I undertook the construction of a simple motor in a mechanical shop opposite the railroad station, having brought with me from Paris some material for that purpose. The consummation of the experiment was, however, delayed until the summer of that year when I finally had the satisfaction of seeing rotation effected by alternating currents of different phase, and without sliding contacts or commutator, as I had conceived a year before. It was an exquisite pleasure but not to compare with the delirium of joy following the first revelation.

Among my new friends was the former Mayor of the city, Mr. Bauzin, whom I had already in a measure acquainted with this and other inventions of mine and whose support I endeavored to enlist. He was sincerely devoted to me and put my project before several wealthy persons but, to my mortification, found no response. He wanted to help me in every possible way and the approach of the first of July, 1919, happens to remind me of a form of "assistance" I received from that charming man, which was not financial but none the less appreciated. In 1870, when the Germans invaded the country, Mr. Bauzin had buried a good sized allotment of St. Estephe of 1801 and he came to the conclusion that he knew no worthier person than myself to consume that precious beverage. This, I may say, is one of the unforgettable incidents to which I have referred. My friend urged me to return to Paris as soon as possible and seek support there. This I was anxious to do but my work and negotiations were protracted owing to all sorts of petty obstacles I encountered so that at times the situation seemed hopeless.

Just to give an idea of German thoroughness and "efficiency," I may mention here a rather funny experience. An incandescent lamp of 16 c.p. was to be placed in a hallway and upon selecting the proper location I ordered the monteur to run the wires. After working for a while he concluded that the engineer had to be consulted and this was done. The latter made several objections but ultimately agreed that the lamp should be placed two inches from the spot I had assigned, whereupon the work proceeded. Then the engineer became worried and told me that Inspector Averdeck should be notified. That important person called, investigated, debated, and decided that the lamp should be shifted back two inches, which was the place I had marked. It was not long, however, before Averdeck got cold feet himself and advised me that he had informed Ober-Inspector Hieronimus of the matter and that I should await his decision. It was several days before the Ober-Inspector was able to free himself of other pressing duties but at last he arrived and a two-hour debate followed, when he decided to move the lamp two inches farther. My hopes that this was the final act were shattered when the Ober-Inspector returned and said to me: "Regierungsrath Funke is so particular that I would not dare to give an order for placing this lamp without his explicit approval." Accordingly arrangements for a visit from that great man were made. We started cleaning up and polishing early in the morning. Everybody brushed up, I put on my gloves and when Funke came

with his retinue he was ceremoniously received. After two hours' deliberation he suddenly exclaimed: "I must be going," and pointing to a place on the ceiling, he ordered me to put the lamp there. It was the exact spot which I had originally chosen,

So it went day after day with variations, but I was determined to achieve at whatever cost and in the end my efforts were rewarded. By the spring of 1884 all the differences were adjusted, the plant formally accepted, and I returned to Paris with pleasing anticipations. One of the administrators had promised me a liberal compensation in case I succeeded, as well as a fair consideration of the improvements I had made in their dynamos and I hoped to realize a substantial sum. There were three administrators whom I shall designate as A, B and C for convenience. When I called on A he told me that B had the say. This gentleman thought that only C could decide and the latter was quite sure that A alone had the power to act. After several laps of this circulus vivios it dawned upon me that my reward was a castle in Spain. The utter failure of my attempts to raise capital for development was another disappointment and when Mr. Batchellor prest me to go to America with a view of redesigning the Edison machines, I determined to try my fortunes in the Land of Golden Promise. But the chance was nearly mist. I liquefied my modest assets, secured accommodations and found myself at the railroad station as the train was pulling out. At that moment I discovered that my money and tickets were gone. What to do was the question. Hercules had plenty of time to deliberate but I had to decide while running alongside the train with opposite feelings surging in my brain like condenser oscillations. Resolve, helped by dexterity, won out in the nick of time and upon passing thru the usual experiences, as trivial as unpleasant, I managed to embark for New York with the remnants of my belongings, some poems and articles I had written, and a package of calculations relating to solutions of an unsolvable integral and to my flying machine. During the voyage I sat most of the time at the stern of the ship watching for an opportunity to save somebody from a watery grave, without the slightest thought of danger. Later when I had absorbed some of the practical American sense I shivered at the recollection and marvelled at my former folly. »<sup>1</sup>

En résumé, bien que le moteur fût conçu en France, s'il n'y a pas été commercialisé en premier c'est faute d'avoir trouvé des investisseurs<sup>2</sup>. Il y a très peu d'informations sur les personnes que Nikola Tesla a rencontrées et à qui il a parlé de son prototype. Dans ses écrits personnels, il mentionna un certain M. Bauzin, ancien maire de Strasbourg, qui lui aurait offert une bouteille de St-Eustache. Cette information est relayée dans plusieurs ouvrages

---

<sup>1</sup> Nikola Tesla, "My inventions", *Electrical Experimenter*, February-June and October 1919. Source: <http://www.tfcbooks.com/tesla/1919-00-00.htm#IV>. The Discovery of the Tesla Coil and Transformer

<sup>2</sup> René Bied-Charreton, « L'utilisation de l'énergie hydraulique. Ses origines, ses grandes étapes », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*. 1955, Tome 8, n°1, pp. 53-72.

biographiques, cependant il n'y aurait jamais eu de M. Bauzin maire de Strasbourg à une quelconque date. Cette information nous a été confirmée par les archives de Strasbourg, contactées par email. Entre 1882 et 1884, il n'y avait pas de conseil municipal français élu car la ville était allemande. À la place, une délégation de notables désignés par l'autorité supérieure gouvernait la ville. À la tête de cette délégation entre le 21 avril 1880 et le 10 juillet 1886, Georg Friedrich Stempel, qui faisait donc office de maire. Le seul Bauzin que les archives de Strasbourg connaissent était Alphonse Bauzin, qui était en 1870 un restaurateur connu qui a même déposé un brevet pour un plat, le « suprême de foie gras aux truffes ». Son restaurant était installé à Strasbourg, au 27 rue de la Nuée-Bleue, puis place Broglie. Sur cette place, en 1871, Henry Carré organisait des soirées de bienfaisance, théâtrales et musicales. Il était président du *Cercle des Arts et du Commerce*, et organisait pour ce cercle des soirées musicales et littéraires dans un local, place Broglie, au premier étage, à côté du café Bauzin. Son fils Albert Carré est devenu le directeur de l'Opéra-Comique et de la Comédie-Française<sup>1</sup>.

Nous avons également trouvé une requête déposée auprès de la délégation municipale de Strasbourg par M. Bauzin datant du 28 janvier 1881 :

« Pétition du sieur Bazin, à Strasbourg, demandant à continuer l'exploitation d'une auberge (n°81) :

M. Heusch lit le rapport suivant :

Messieurs, cet estaminet avait été loué par M. Bauzin pendant trois ans et demi, et il a dû résilier le bail pour des raisons d'inconduite de son locataire et de sa femme.

Depuis quatre ans il a présenté à différentes reprises des locataires, auxquels on a toujours refusé la concession d'un débit de boissons dans la susdite maison.

Comme l'autorité est juge pour les concessions à accorder, et en raison des vœux réitérés de la Délégation et de sa décision prise dans la dernière session, qui tendait à diminuer le nombre des débits de boissons, votre 1<sup>ère</sup> Commission vous propose de passer à l'ordre du jour.

L'Assemblée adopte les conclusions du rapport. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Source : Bulletin - Société académique du Bas-Rhin pour le progrès des sciences, des lettres, des arts et de la vie économique, 1913.

<sup>2</sup> Source : *Imprimés de la délégation d'Alsace-Lorraine. VIe-IXe session, 1879-1882. 15<sup>ème</sup> séance, vendredi 28 janvier 1881, 3 heures de l'après-midi, Landesausschuss d'Alsace-Lorraine, VIIIe session.*

Le M. Bauzin dont Nikola Tesla faisait référence à la fin de sa vie était-il non pas le maire de Strasbourg mais plutôt le gérant du café où se tenaient les soirées du *Cercle des Arts et du Commerce* ?

## 2. Nikola Tesla aux Etats-Unis (à partir de 1884)

En 1884, Nikola Tesla déménagea aux Etats-Unis. En 1887, il fonda la *Tesla Electric Company*<sup>1</sup>. En mai 1888, il faisait breveter une génératrice, un transformateur et un moteur. En juillet de la même année, les rédacteurs de *La Lumière Electrique* écrivaient à ce propos : « M. Tesla vient de décrire à l'*American Institute of Electrical Engineers* un nouveau système de moteurs à courants alternatifs qui a fait un certain bruit, et qui pourra peut-être, avec certaines modifications, résoudre le problème de la transmission du travail par les courants alternatifs. »<sup>2</sup>

L'industriel nord-américain George Westinghouse (1846 – 1914) ne tarda pas à lui racheter son brevet et se dota ainsi d'un système complet de production, transport et distribution d'électricité, comme son concurrent Thomas Edison six années plus tôt.

Pour contraster avec le récit de son arrivée à Paris, voici comment Nikola Tesla décrit son arrivée aux Etats-Unis :

"I wish that I could put in words my first impressions of this country. In the Arabian Tales I read how genii transported people into a land of dreams to live thru delightful adventures. My case was just the reverse. The genii had carried me from a world of dreams into one of realities. What I had left was beautiful, artistic and fascinating in every way; what I saw here was machined, rough and unattractive. A burly policeman was twirling his stick which looked to me as big as a log. I approached him politely with the request to direct me. "Six blocks down, then to the left," he said, with murder in his eyes. "Is this America?" I asked myself in painful surprise. "It is a century behind Europe in civilization." When I went abroad in 1889 - five years having elapsed since my arrival here - I became convinced that it was more than one hundred years AHEAD of Europe and nothing has happened to this day to change my opinion.

---

<sup>1</sup> Albert Turpain, *ibid.*, p163.

<sup>2</sup> Section « Etats-Unis », « Le moteur à courants alternatifs de N. Tesla », *La Lumière Electrique*, Volume 29, n°28, 14 juillet 1888, p87.

The meeting with Edison was a memorable event in my life. I was amazed at this wonderful man who, without early advantages and scientific training, had accomplished so much. I had studied a dozen languages, delved in literature and art, and had spent my best years in libraries reading all sorts of stuff that fell into my hands, from Newton's "Principia" to the novels of Paul de Kock, and felt that most of my life had been squandered. But it did not take long before I recognized that it was the best thing I could have done. Within a few weeks I had won Edison's confidence and it came about in this way.

The S.S. Oregon, the fastest passenger steamer at that time, had both of its lighting machines disabled and its sailing was delayed. As the superstructure had been built after their installation it was impossible to remove them from the hold. The predicament was a serious one and Edison was much annoyed. In the evening I took the necessary instruments with me and went aboard the vessel where I stayed for the night. The dynamos were in bad condition, having several short-circuits and breaks, but with the assistance of the crew I succeeded in putting them in good shape. At five o'clock in the morning, when passing along Fifth Avenue on my way to the shop, I met Edison with Batchellor and a few others as they were returning home to retire. "Here is our Parisian running around at night," he said. When I told him that I was coming from the Oregon and had repaired both machines, he looked at me in silence and walked away without another word. But when he had gone some distance I heard him remark: "Batchellor, this is a d-n good man," and from that time on I had full freedom in directing the work. For nearly a year my regular hours were from 10.30 A.M. until 5 o'clock the next morning without a day's exception. Edison said to me: "I have had many hard-working assistants but you take the cake." During this period I designed twenty-four different types of standard machines with short cores and of uniform pattern which replaced the old ones. The Manager had promised me fifty thousand dollars on the completion of this task but it turned out to be a practical joke. This gave me a painful shock and I resigned my position.

Immediately thereafter some people approached me with the proposal of forming an arc light company under my name, to which I agreed. Here finally was an opportunity to develop the motor, but when I broached the subject to my new associates they said: "No, we want the arc lamp. We don't care for this alternating current of yours." In 1886 my system of arc lighting was perfected and adopted for factory and municipal lighting, and I was free, but with no other possession than a beautifully engraved certificate of stock of hypothetical value. Then followed a period of struggle in the new medium for which I was not fitted, but the reward came in the end and in April, 1887, the Tesla Electric Company was organized, providing a laboratory and facilities. The motors I built there were exactly as I had imagined them. I made no attempt to improve the design, but merely reproduced the pictures as they appeared to my vision and the operation was always as I expected.

In the early part of 1888 an arrangement was made with the Westinghouse Company for the manufacture of the motors on a large scale. But great difficulties had still to be overcome. My system was based on the use of low frequency currents and the Westinghouse experts had adopted 133 cycles with the object of securing advantages in the transformation. They did not want to depart from their standard forms of apparatus and my efforts had to be concentrated upon adapting the motor to these conditions. Another necessity was to produce a motor capable of running efficiently at this frequency on two wires which was not easy of accomplishment. (...)”<sup>1</sup>

Jusqu’au rachat du brevet de Lucien Gaulard par la compagnie américaine *Westinghouse* et la bataille médiatique des courants qui suivit, le soutien français pour les systèmes à courant alternatif était très faible. Nikola Tesla, à qui l’on doit un système complet de production, transport et distribution à courants alternatifs, tenta alors qu’il était ingénieur de la *Compagnie continentale Edison* en France entre 1882 et 1884 de trouver des investisseurs français pour l’aider à commercialiser son invention, un moteur à courants alternatifs polyphasés, sans succès. Les raisons de cet insuccès sont sans doute multiples ; était-ce parce que tous les investissements étaient engagés du côté de la solution en courant continu de Marcel Deprez ?

Dans sa recherche de financement, Nikola Tesla s’est trouvé dans une situation analogue à celle de Samuel Morse (1791 – 1872), inventeur du télégraphe électrique, à devoir naviguer de la France vers les Etats-Unis pour parvenir à ses fins.

Fils d’un géographe américain renommé, Samuel Morse était également peintre. Il fonda l’Académie nationale de dessin aux Etats-Unis, en fut le premier président et le resta pendant 16 ans. Il effectua deux voyages de plusieurs années en Europe. Jusqu’en 1835, il fut professeur à la chaire de littérature relative aux arts du dessin de l’université de New York, date à laquelle il finit de construire son premier télégraphe. L’idée de cet appareil lui vint en 1832 pendant son second voyage de retour en bateau de l’Europe vers les Etats-Unis. Les premières expériences publiques avec le télégraphe de Samuel Morse eurent lieu en 1835. En 1839, n’ayant toujours pas trouvé d’investisseurs aux Etats-Unis, il se rendit en Europe, en Angleterre et en France. En Angleterre, Wheatstone avait déjà breveté un appareil

---

<sup>1</sup> Nikola Tesla, “My inventions”, *Electrical Experimenter*, February-June and October 1919. Source: <http://www.tfcbooks.com/tesla/1919-00-00.htm#IV>. The Discovery of the Tesla Coil and Transformer

télégraphique et Morse se vit refuser l'obtention de son brevet. En revanche, il l'obtint en France. Le vulgarisateur scientifique Louis Figuier (1819 – 1894), qui avait pu rencontrer en personne Samuel Morse et discuter avec lui de son invention, suggéra que l'obtention d'un brevet en France n'était pas suffisante pour trouver des investisseurs et commercialiser une invention. Samuel Morse décida alors de poursuivre ses recherches aux Etats-Unis, qui portèrent leurs fruits. En 1844 fut inaugurée la première ligne télégraphique entre Washington et Baltimore.

## **2. Tramways électriques. Passage du courant continu à l'alternatif. Une construction des moteurs adaptée**

### *Prelude – Marché des premières lignes de tramways électriques en France et aux Etats-Unis*

Nous nous intéressons ici brièvement aux premières lignes de tramways avant l'arrivée des moteurs électriques, puis aux premiers essais d'électrification par Siemens, aux différences dans la mise en exploitation des premières lignes de tramways électriques aux Etats-Unis puis en France, ainsi qu'au métro parisien et à la spécificité de ce moyen de transport urbain.

#### *1. Premières lignes de tramway à chevaux et à vapeur aux Etats-Unis*

Les tout premiers rails en fonte posés sur les routes existantes et au même niveau qu'elles servaient au transport des wagons remplis de charbon au Nord-Est de l'Angleterre dès le milieu du 18<sup>ème</sup> siècle.

Néanmoins un siècle plus tard, les tramways, principalement à chevaux mais aussi à machines à vapeur, étaient considérés comme étant originaires des Etats-Unis car c'est là qu'ils étaient le plus répandu : « Nous appelons en France *tramways* les *chemins de fer américains*, et les anglais les désignent encore souvent sous le nom d'*american tramways* parce que c'est en Amérique que ce genre de voie a reçu sa plus grande extension. (...). Chez un peuple entreprenant comme le peuple américain, qui considère la facilité des communications comme un élément puissant de

civilisation, il n'est pas étonnant que les tramways se soient développés aussi rapidement que les chemins de fer à grande distance. »<sup>1</sup>

L'origine géographique du développement de cette technique de transport peut s'expliquer par le fait que les villes nord-américaines étaient soit toutes neuves, soit encore à construire, notamment à l'Ouest du pays. En 1856, « Le voyageur qui parcourt ces nouvelles contrées de l'ouest est surpris de voir tout le long des lignes de chemins de fer à peine terminées s'élever comme par enchantement des villages et des villes (...) »<sup>2</sup>.

Les tramways furent importés en France à partir de 1853 par Loubat, un ingénieur français qui avait longtemps vécu aux Etats-Unis<sup>3</sup>.

## 2. Siemens, pionnier de la traction électrique sur rails

Le premier tramway électrique relié à une sous-station fut conçu par l'entreprise allemande *Siemens & Halske* et exposé en 1879 à l'Exposition de Berlin. Un gros moteur électrique était installé sur la locomotive qui tirait derrière elle quelques wagons, sur une boucle de 300 mètres. La puissance de la locomotive était de 2kW environ, soit un peu moins de 3 chevaux-vapeur. Le moteur de la locomotive, construit par l'entreprise Siemens & Halske, était alimenté à distance par une génératrice grâce à un conducteur en fer entre les rails du train, ces derniers permettant de boucler le circuit, le retour du courant s'effectuant par les rails.

Werner Siemens (1816 – 1892) pensait, dès 1867, qu'il était possible d'utiliser les génératrices de courant le soir pour l'éclairage, et le jour pour les transports. Un article paru dans *La Lumière Electrique* résume ses propos tenus le 18 mai 1881 à la *Society of Arts* de Londres :

« C'est en 1867 que M. Werner Siemens a eu l'idée d'utiliser les machines dynamo-électriques à la transmission de la force ; elle lui est venue en discutant la possibilité d'établir des chemins de fer électriques aériens. La machine dynamo-électrique n'était pas alors encore assez parfaite pour

---

<sup>1</sup> F. Sérafon (1872), *Étude sur les chemins de fer, les tramways et les moyens de transport en commun à Paris et à Londres suivie d'une Notice sur la construction et l'exploitation des tramways*, Paris : Dunod, p76.

<sup>2</sup> M. Grenier, « Note sur les chemins de fer aux Etats-Unis d'Amérique », *Mémoires et compte-rendu des travaux de la société des ingénieurs civils*, Volume 9, 1856, p110.

<sup>3</sup> F. Sérafon (1872), *Étude sur les chemins de fer, les tramways et les moyens de transport en commun à Paris et à Londres suivie d'une Notice sur la construction et l'exploitation des tramways*, Paris : Dunod, p77.

permettre la réalisation de cette idée, mais aujourd'hui, que les machines ont été perfectionnées en vue de l'éclairage, on peut songer à utiliser le jour, pour transmettre la force, les appareils destinés le soir à produire la lumière, et comme, agissant ainsi on ne ferait, qu'utiliser plus complètement les capitaux engagés, on peut être certain de voir se réaliser cette combinaison. »<sup>1</sup>

Les avantages du chemin de fer électrique sur les autres systèmes étaient selon Werner Siemens les suivants : contrairement aux tramways à vapeur, le matériel de motorisation était beaucoup moins lourd. Les voitures étant plus légères, la puissance nécessaire pour les faire rouler était réduite et les ponts et autres constructions de ce type pouvaient être bâtis de manière plus économique. Chaque voiture de tramway pouvait disposer de son propre moteur électrique, ce qui permettait de rouler sur des routes pentues à plus grande vitesse que lorsqu'un seul moteur était installé uniquement sur la première voiture. Le système de freinage pouvait être composé, en plus des freins ordinaires, de la mise en court-circuit des moteurs qui agissaient alors comme des freins. Enfin, l'électricité pouvait être produite de manière centralisée, en grande quantité grâce à des machines de grande dimension, ce qui permettait de réaliser des économies d'échelle, et d'utiliser presque gratuitement l'énergie hydraulique des chutes d'eau.

Après l'Exposition de Berlin en 1879, le tramway Siemens a ensuite été présenté à Düsseldorf, à Bruxelles, au Palais de Cristal de Sydenham puis à l'Exposition à Paris en 1881, devenant ainsi le premier tramway à avoir roulé en France. Il reliait ce qui était alors le Palais de l'Industrie (actuel Grand Palais), où se tenait l'Exposition, à la Place de la Concorde. Contrairement à ce qui avait été installé en Allemagne, le transport du courant s'effectuait par deux fils aériens<sup>2</sup>.

A la même période, l'entreprise Siemens & Halske présenta un projet de tramway électrique avec fils aériens aux autorités de la ville de Berlin. La ligne devait traverser une seule rue, sur une longueur de 10 kilomètres. En voici une brève description : « Le chemin de fer aurait été établi sur des colonnes de 4m,40 disposées le long des trottoirs à 10 mètres l'une de l'autre. Les rails, distants

---

<sup>1</sup> Auguste Guérout, « Les chemins de fer électriques et la transmission de la force par l'électricité, par M. Alexandre Siemens », *La Lumière Electrique*, Volume 4, n°29, 9 juillet 1881, p42 à 45, p42.

<sup>2</sup> Sources : *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1928, p182. Henri de Graffigny (1907), *La locomotion électrique*, Paris : Librairie des publications populaires, p8-9.

d'un mètre, auraient servi de conducteurs, chaque voiture aurait été munie d'une machine dynamo-électrique, et la vitesse de marche eût été de 30 kilomètres à l'heure. »<sup>1</sup>

Ils prévoyaient de couvrir les frais d'établissement et d'exploitation avec 200 départs par jour, comprenant 5 à 6 voyageurs dans chacune des 6 voitures. Bien que le projet tel quel ne fut pas accepté, ils obtinrent néanmoins l'autorisation de construire une ligne semblable entre le quartier Lichterfelde et l'Académie militaire de la ville de Berlin. La différence était que la ligne, qui faisait 2 km de long, n'avait plus qu'une seule voiture<sup>2</sup>.

### *3. Avantage des rails électrifiés*

Pour amener le courant électrique de la centrale jusqu'aux moteurs de chemins de fer, il fallait passer par un intermédiaire, la sous-station, qui abaissait le courant à une tension acceptable pour les moteurs. Aux Etats-Unis comme en Europe, de la sous-station aux moteurs, les systèmes par fil aérien étaient les plus répandus. Cependant, d'autres systèmes existaient, tels que celui avec une voie centrale entre les deux rails, ou bien celui avec un conducteur souterrain. L'inconvénient du système avec conducteur souterrain était que la boue et l'eau s'infiltraient dans le tuyau qui entourait le câble souterrain par le trou par lequel passait le collecteur du véhicule de tramway. Les fils aériens posaient des problèmes esthétiques, plus que techniques, et étaient considérés par certaines municipalités comme dangereux.

Dans tous ces systèmes, les rails servaient au retour du courant. L'inconvénient était qu'ils étaient difficiles à isoler électriquement, et du reste de la route. L'avantage était que les roues adhéraient mieux. Un autre avantage du retour du courant par les rails était l'économie réalisée sur des fils conducteurs qui auraient rempli ce rôle.

---

<sup>1</sup> Auguste Guérout, *ibid.*

<sup>2</sup> *Ibid.*, p43.

#### 4. Premières lignes de tramways électriques en exploitation commerciale aux Etats-Unis

Dès le milieu des années 1880, les lignes de tramways, traditionnellement utilisés avec des machines à vapeur ou des chevaux, s'électrifièrent très rapidement aux Etats-Unis, plus rapidement qu'en Europe. Ces premières lignes étaient courtes et allaient de la banlieue vers les portes de la ville. Par la suite, les lignes s'installèrent à l'intérieur des villes.

En 1890, les deux principales entreprises sur le marché des tramways électriques aux Etats-Unis étaient la *Thomson-Houston Electric Company*, fondée par Elihu Thomson et Adwin Houston, et la *Sprague Company*, fondée par Frank Sprague. Une troisième entreprise, Daft, exploitait 11 lignes représentant 56 km. Le reste des lignes, 20, était exploité par de plus petites compagnies et représentait 150 km.

A la fin de l'année 1885 lors de la réunion de la *National Electric Light Association* tenue à New York, les membres de l'association demandèrent à Charles von DePoele (1846 – 1892), émigré belge aux Etats-Unis spécialiste de la traction électrique, de rédiger un rapport sur l'état de la traction électrique aux Etats-Unis. Dans ce rapport, lu devant les membres de l'association à la réunion suivante en février 1886, Van De Poele parla de sa propre expérience d'installation de lignes de tramways électriques<sup>1</sup>. Il présenta une revue des installations supervisées par lui-même entre la fin de l'année 1885 et le début de l'année 1886, basées sur un système de trolley. Son expérience lui faisait dire à la fin de sa présentation que tout était prêt d'un point de vue technique pour que l'exploitation des tramways électriques commençât. Les chutes d'eau se gaspillaient, alors qu'elles pouvaient d'ores et déjà être utilisées pour éclairer, travailler et se déplacer. Une chose manquait néanmoins selon lui, un instrument de mesure des hautes tensions réellement pratique. Dans cette présentation de février 1886, Van De Poele précisa qu'il utilisait les appareils de mesure de « Duprez & Carpentier », soit Duprez et Carpentier, de Paris, et d'Ayrton & Perry, de Londres.

En 1889, la *Thomson-Houston Electric Company* racheta l'entreprise de Charles von DePoele et présenta un tramway à une voiture avec fil aérien à Paris en 1889 lors de l'Exposition

---

<sup>1</sup> Papier de Mr. Van De Poele lu par le secrétaire de la *National Electric Light Association* en 1886.

universelle, d'une capacité de 40 voyageurs et sur laquelle deux moteurs étaient installés, de sorte qu'elle avait suffisamment de puissance pour éventuellement en tracter une autre.

Ci-dessous une illustration du tramway de la Thomson-Houston circulant à Washington :

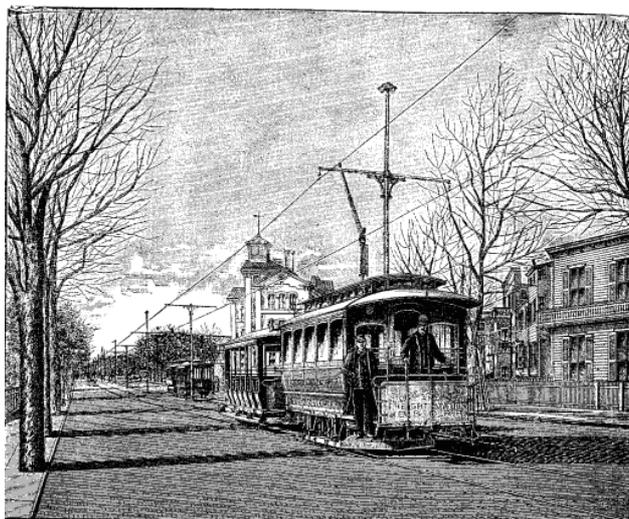


Fig. 1039. — Tramway électrique Thomson-Houston à Washington.

Source : Julien Lefèvre et Edmond Bouty (1891), *Dictionnaire d'électricité comprenant les applications aux sciences, aux arts et à l'industrie*, Paris : Librairie J.-B. Baillière et fils, p886.

En 1890, 180 villes selon *La Lumière Electrique*, 130 selon Frank Sprague, possédaient une ligne de tramway électrique aux Etats-Unis. Ci-dessous un tableau donnant les chiffres issus de ces deux sources :

Année 1890	<i>La Lumière Electrique</i>	Frank J. Sprague
Villes états-uniennes équipées	180	130
Longueur du réseau de tramways (km)	3 000	2 500
Nombre de véhicules de tramways en circulation	2 500	1 700
Puissance électrique développée par les moteurs des tramways (chevaux)	30 000	45 000

### 5. Essor commercial tardif des tramways électriques en France

Au même moment, il n'y avait que 12 lignes installées en Europe. Lors d'une présentation devant les membres de la *National Electric Light Association* en février 1890<sup>1</sup>, Frank Sprague soutint l'idée, que l'on retrouve dans *La Lumière Electrique*, que l'enfance du tramway électrique eut pour décor l'Europe, plus particulièrement la France selon *La Lumière Electrique*, et que sa vie de jeune adulte se fit aux Etats-Unis.

En 1889, le seul tramway électrique à fil aérien installé en France fut construit par la *Compagnie Française Thomson-Houston*, qui avait son siège en France au 10 rue de Londres, à Paris<sup>2</sup>. Il était installé à Clermont-Ferrand sur une ligne qui faisait 7 km. Le tramway, composé d'une voiture, avait une capacité de 70 voyageurs.

Dans le rapport de l'Exposition universelle de 1889, paru en 1892, on justifiait le plus grand nombre de lignes de tramways électriques en exploitation aux Etats-Unis par le fait que de manière générale, il y avait plus d'entrepreneurs s'occupant de la mise en exploitation des machines électriques, tandis qu'en France, on se préoccupait plus de la conception de ces machines :

« Aux Etats-Unis, la préoccupation capitale a été de créer des ensembles d'éclairage : tandis qu'en Amérique les *stations centrales* se sont développées avec une rapidité prodigieuse – (1) : La première station centrale fut élevée à New York en 1882 ; dès le mois de septembre 1890, les Etats-Unis comptaient plus de 1,350 stations analogues en exploitation.–, il n'en existe encore qu'un petit nombre en Europe [en 1892] ; à l'inverse des compagnies américaines qui vendent de la lumière, les constructeurs européens font surtout des installations et vendent des machines, régulateurs, etc., sans s'occuper de l'exploitation. Ainsi s'explique la différence profonde de caractère et de tendances, constatée en 1889 entre la section américaine et les sections européennes : bien qu'incomplète par suite d'abstention de sociétés très importantes, l'exposition des Etats-Unis comportait des installations nombreuses et des systèmes complets d'éclairage (Edison, Thomson-Houston, Sperry, pour ne parler

---

<sup>1</sup> Frank J. Sprague, « Application of Electricity to Street Railways », *Proceedings of the National Electric Light Association*, Février 1890, p199.

<sup>2</sup> A cette adresse se trouve aujourd'hui le siège de *Google France*.

que des courants continus) ; mais c'était dans les expositions anglaise, belge, française et suisse que l'on rencontrait les dynamos et les moteurs les plus puissants et les plus perfectionnés. »<sup>1</sup>

Dans un article pour *La Lumière Electrique* faisant une revue des installations de l'époque et datant de la même année, l'auteur reconnaissait que les systèmes de distribution les plus intéressants se trouvaient aux Etats-Unis. Selon lui, il n'y avait pas d'explications d'ordre technique à un tel essor du marché des tramways électriques aux Etats-Unis. L'explication tenait plutôt au fait qu'aux Etats-Unis, la mise en pratique des inventions techniques se faisait plus facilement :

« (...) Depuis deux ans, les lignes de tramways et de chemins de fer basées sur la traction électrique se sont multipliées, surtout en Amérique, avec une rapidité dont il est difficile de trouver la véritable cause ; en effet, aucune invention saillante n'est venue changer la face des choses : il faut donc chercher les progrès de cette nouvelle industrie plutôt dans une application raisonnée de principes connus que dans les conséquences des nouvelles inventions. »<sup>2</sup>

En 1893, lors du banquet du *Syndicat professionnel des industries électriques*, où le ministre des Postes et Télégraphes était présent, Hippolyte Fontaine annonça les chiffres suivants :

« Nous avons aujourd'hui 300 stations centrales de lumière et 3 ou 4 lignes de tramways électriques, qui représentent ensemble une puissance d'environ 60 000 chevaux et un capital de 70 millions. Les Etats-Unis ont plus de 2 000 stations de lumière et 500 lignes de tramways électriques, qui représentent une puissance de 900 000 chevaux et un capital dépassant un milliard de francs. »<sup>3</sup>

Après l'Exposition universelle de 1878, Hippolyte Fontaine estimait que la France s'était laissée dépasser par d'autres pays, principalement par les Etats-Unis, et ce « au triple point de vue de l'importance, de la variété et du nombre des applications électriques »<sup>4</sup>. Ce qui l'amena à commenter ces chiffres de la manière suivante :

« Cette comparaison nous humilie un peu ; mais loin d'être un sujet de découragement, elle doit faire naître en nous une salutaire émulation. Nous n'ignorons pas que les Américains ont des

---

<sup>1</sup> France. Ministère du commerce, de l'industrie et des colonies (1892), « Exposition universelle internationale de 1889 à Paris. Rapport général, Tome septième. L'outillage et les procédés des industries mécaniques. L'électricité. Groupe VI », Paris : Imprimerie nationale, p303.

<sup>2</sup> P.-H. Ledeboer, « Chemins de fer et tramways électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 34, n°48, 30 novembre 1889, p418-423 ; n°49, 7 décembre 1889, p472-480 ; n°52, 28 décembre 2014, p611-615, p418.

<sup>3</sup> « Statistiques sur le nombre de stations centrale électriques en France et aux Etats-Unis en 1893 », *La Lumière Electrique*, 1893, Volume 48, p98-99, p98.

<sup>4</sup> « Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 48, n°15, 15 avril 1893, p98-99, p98.

besoins supérieurs aux nôtres ; mais nous savons aussi que, parmi les installations réalisées par leurs électriciens, il s'en trouve beaucoup qui rendraient ici d'immenses services, et nous avons à cœur d'en doter la France.

Pour réussir, il nous faut le concours de bien des bonnes volontés, l'appui des pouvoirs publics et la bienveillance de l'administration. Il ne faut pas se dissimuler que nous sommes encore loin d'avoir en France toutes les facilités et tous les renseignements que rencontre l'initiative privée aux Etats-Unis, et il me serait facile de citer des circulaires et des règlements en désaccord avec les progrès actuels de la science et les perfectionnements récents de l'industrie électrique. »<sup>1</sup>

En ce qui concerne l'aspect administratif qu'Hippolyte Fontaine mentionne ci-dessus, d'après la loi du 11 juin 1880, avant toute construction de chemin de fer, il fallait obtenir en France une concession de l'Etat. D'après l'article 1<sup>er</sup> du décret du 18 mai 1881, les demandes d'établissement de voies ferrées sur des voies dépendant du domaine public devaient être adressées au Ministre des Travaux Publics, par l'intermédiaire du préfet de la région. Selon l'article 4 du même décret, l'Etat décidait ensuite s'il était nécessaire de mener une enquête. Ce décret posa problème en 1893 entre la ville de Paris et l'Etat. En effet, si le tramway était considéré comme un chemin de fer, alors c'était à l'Etat d'accorder la concession et non à la ville. Le bulletin officiel de l'Exposition de Lyon en 1894 nous indique ceci :

« Un assez gros différend est à la veille de surgir entre le ministère des travaux publics et le conseil municipal de Paris. Il s'agit du droit de concession attribué à la Ville de Paris en matière de tramways tubulaires et même de tramways à ciel ouvert à traction électrique.

Le gouvernement hésiterait, paraît-il, à reconnaître le droit de la Ville à concéder directement certains genres de tramways qui, d'après sa jurisprudence, auraient le caractère de chemins de fer. L'Etat seul aurait qualité, si cette prétention est maintenue, pour se prononcer sur les concessions de cette nature. »<sup>2</sup>

En 1912, le directeur général de la *Compagnie générale des omnibus de Paris*, A. Mariage, fit une conférence devant la *Société des Ingénieurs Civils* sur l'électrification des lignes de tramway parisiennes, qui ne commença pas avant cette date. La raison principale mise en avant pour

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> *Bulletin officiel de l'Exposition universelle, internationale et coloniale de Lyon en 1894*, 16 février 1893, p5.

expliquer cette électrification tardive, qui vint remplacer la traction par chevaux et à vapeur, était que la concession que lui avait accordée la ville de Paris en 1900 expirait le 31 mai 1910 : « C'est pourquoi, pour les transformations qui ont été entreprises de 1900 à 1905, la Compagnie n'a pas voulu s'imposer les frais de l'établissement de caniveaux qui n'eussent pu être amortis en si peu de temps. »<sup>1</sup>

A partir de 1910, la concession fut cette fois de 40 ans, ce qui motiva le directeur à investir dans les frais élevés de premier établissement nécessaires à l'électrification des lignes :

« En 1910, le réseau municipal de tramways, concédé à la Ville de Paris, a été de nouveau rétrocédé par celle-ci à la Compagnie des Omnibus pour une durée de 40 ans. Le cahier des charges stipulait simplement que la traction devait être mécanique, mais n'imposait aucun mode de traction particulier. Néanmoins, la Compagnie n'a plus alors hésité à adopter définitivement la traction électrique pour l'ensemble de ce réseau, dont les lignes actuelles et à venir sont au nombre de près de 40. »<sup>2</sup>

Pour faire le bilan sur le marché naissant des tramways électriques en France et aux Etats-Unis, revenons sur l'unique ligne de tramway installée à Clermont-Ferrand en 1889, à propos de laquelle *La Lumière Electrique* écrivait : « Cette ligne a été construite pour le compte de M. Claret, entrepreneur, que nous félicitons de son heureuse initiative. Lorsqu'on met en opposition cette seule ligne existant en France, avec les lignes si nombreuses des Etats-Unis, on ne peut que souhaiter à M. Claret des imitateurs. »<sup>3</sup>

Faudrait-il donc une nouvelle fois mobiliser *Les lois de l'imitation* de Gabriel Tarde pour expliquer une telle croissance des tramways électriques aux Etats-Unis ? L'explication se trouve-t-elle sinon dans la plus grande facilité administrative et fiscale pour y installer des centrales électriques ? Auquel cas en France, les lois de l'imitation se seraient heurtées aux lois administratives, ce qui aurait empêché la construction de lignes de tramways. Ou alors, peut-on de nouveau expliquer cette lente montée en efficacité par le contexte politique parisien et la guerre des courants à la française ?

---

<sup>1</sup> J. Simey, « L'électrification du réseau des tramways de la Compagnie générale des Omnibus de Paris, *La Lumière Electrique*, Volume 20, n°48, 30 novembre 1912, p272.

<sup>2</sup> Ibid., p272-273.

<sup>3</sup> P.H. Ledeboer, « Chemins de fer et tramways électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 34, 1889, p615.

Ou bien est-ce que l'explication tient aussi dans le fait que les Etats-Unis ayant initialement un plus grand nombre de lignes de tramway que l'Europe, il est normal qu'elle se retrouve, à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, avec un nombre de lignes électrifiées plus élevé.

#### 6. Métro parisien. Désencombrer la ville

Concernant la création du métro parisien, comme pour le tramway, l'objectif était de faciliter les transports dans la ville ; son caractère souterrain ou aérien visait à ne pas occuper le même espace, contrairement au tramway. Rappelons en effet la différence entre un tramway et un chemin de fer sur route, métropolitain ou champêtre :

« Un tramway ne circule que dans les rues des cités, tandis que les chemins de fer sur routes sont établis sur les accotements des grandes routes ou coupent même à travers champs. Mais la différence est encore bien plus grande en ce qui concerne les voies. Celles des tramways sont à ornières, et le dessus des rails affleure la chaussée, au lieu d'être en relief et posées sur le sol. Il en résulte que la voie du chemin de fer routier n'a à supporter que les efforts résultant du passage des trains dont la charge et la vitesse ont été déterminées par les ingénieurs de la compagnie, tandis qu'il en est tout autrement pour les tramways installés dans les villes, où une voie posée dans un quartier très fréquenté a plus à souffrir des poussées latérales du roulage que de la fatigue et de la flexion des rails sous le poids des cars circulant sur cette voie. »<sup>1</sup>

D'où est venu le besoin d'installer des chemins de fer dans les villes ? En 1872, F. Sérafon nous explique qu'à Paris, les « (...) les chemins de fer ne jouent qu'un rôle secondaire dans les moyens de transport en commun à l'intérieur de la capitale.

La première place appartient aux omnibus.

Cette exploitation est représentée par la Compagnie Générale des Omnibus qui a le privilège de ce genre de service dans l'intérieur de Paris.

En échange de ce privilège, la Ville s'est réservé le droit de contrôler les actes de l'entreprise, de lui imposer certains parcours, de régler le nombre des départs et de fixer les tarifs. »<sup>2</sup>

On reprochait alors à la *Compagnie Générale des Omnibus* de ne pas faire circuler suffisamment d'omnibus, qui répondait qu'il n'était pas rentable de faire circuler plus d'omnibus car leur

---

<sup>1</sup> E. Sérafon (1898), *Les tramways, les chemins de fer sur routes, les automobiles et les chemins de fer de montagne à crémaillère*, Paris : Boyveau et Chevillet, p15-16.

<sup>2</sup> F. Sérafon (1872), *ibid.*, p62.

circulation insuffisante ne se faisait ressentir que le dimanche et les jours de fête. La plupart du temps, elle aurait donc eu à faire circuler plus d'omnibus que de besoin. Selon les dirigeants de cette Compagnie, la concurrence ne pouvait résoudre ce problème car tous se seraient alors concentrés sur l'exploitation des lignes les plus utilisées, délaissant les autres. F. Sérafon de commenter : « Cette objection est fondée si l'on songe que certains quartiers de Paris ne doivent les communications par omnibus qu'au droit que s'est réservé la Ville d'imposer à la Compagnie privilégiée des parcours onéreux pour cette dernière, mais qui sont d'utilité publique. »<sup>1</sup>

Comme pour le transport de l'électricité, l'adaptation de l'offre à la demande en temps réel est dans la pratique difficile et pourtant nécessaire aux entreprises souhaitant minimiser leurs frais d'établissement. Cette question sera abordée plus en détail dans la partie sur la tarification qui suit.

Le développement des réseaux de tramways et métro parisiens devait donc venir compenser le nombre insuffisant d'omnibus. C'est ce qui fut fait à Londres avec l'inauguration de la première ligne de métro le 10 janvier 1863, suivie par d'autres villes européennes dont Paris : « La question des transports en commun dans les villes est une question d'actualité.

Toutes les grandes cités d'Europe cherchent à imiter Londres et à introduire le système des tramways ou celui des chemins de fer ordinaires, là où la circulation rend le service des omnibus insuffisant. »<sup>2</sup>

A Londres, ce furent d'abord les compagnies de chemins de fer régionaux qui eurent l'autorisation d'installer des lignes de chemins de fer métropolitains :

« Lors de la construction des grandes lignes de chemins de fer qui viennent aboutir à Londres, on assigna aux compagnies une certaine zone pour l'établissement des gares qui devaient desservir la capitale.

Cette zone métropolitaine renferme aujourd'hui, outre les têtes des grandes lignes, tout un réseau de chemins de fer métropolitains, destinés à rendre faciles et rapides les communications entre les divers quartiers de la ville. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid., p64.

<sup>2</sup> Ibid., pV.

<sup>3</sup> MM. Derome et Boreux, « Note sur le Metropolitan Railway ou chemin de fer souterrain de Londres », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, Tome XV, Février 1868, p105.

A Paris, comme pour les tramways, des débats eurent lieu entre l'Etat et la municipalité sur l'exploitation du métro. La difficulté à y mettre un terme retarda son installation. De nombreux projets furent présentés entre 1871, date à laquelle le Conseil général de la Seine lança l'étude d'un projet de réseau similaire à celui construit à Londres, et 1900, date de l'inauguration avec les deux lignes Gare d'Orsay – Juvisy et Gare des Invalides – Versailles<sup>1</sup>. Albin Dumas explique en 1901 qu'« Une divergence de vues absolue et irréductible existait, en effet, entre la Ville et le Gouvernement. Tandis que ce dernier attribuait au Métropolitain de la capitale un caractère d'intérêt général et voulait l'utiliser pour raccorder entre elles les gares des grandes Compagnies, les édiles de la Ville de Paris persistaient à la considérer comme devant être d'intérêt purement local, réservé aux besoins de la circulation urbaine et indépendant des lignes des grands réseaux.

Cette discussion stérile durerait sans doute encore si la perspective des besoins créés par l'Exposition universelle de 1900 n'avait fait entrer les deux parties en litige dans la voie de la conciliation. En échange du concours prêté par la Ville de Paris à la préparation de l'Exposition, le Gouvernement a consenti à se départir en sa faveur de la manière de voir qu'il avait eue jusqu'alors au sujet du Métropolitain. Par lettre en date du 22 novembre 1895, le ministère des Travaux publics a mis fin au conflit et reconnu à la Ville le droit d'assurer elle-même l'exécution, à titre d'intérêt local, des lignes spécialement destinées à desservir des intérêts urbains. Grâce à cette décision, la question est entrée dans une nouvelle voie, féconde en résultats pratiques et qui a rapidement conduit à la solution aujourd'hui en partie exécutée. »<sup>2</sup>

Début 1896, à l'issue du débat entre la Ville de Paris et l'Etat, où les arguments de la ville l'emportèrent finalement, une commission du Conseil municipal donna deux motivations à la construction du métro : « suppléer à l'insuffisance des moyens de transport du Paris actuel et mettre en valeur les quartiers éloignés et les moins peuplés de la capitale. »<sup>3</sup>

Parmi les projets présentés, certains proposaient un réseau aérien, d'autre souterrain. Le but dans les deux cas était de ne pas plus encombrer les voies de circulation existantes.

---

<sup>1</sup> Albin Dumas (1901), *Le Chemin de fer métropolitain de Paris. Description du réseau projeté- Lignes actuellement exécutées - Usine de Bercy - Exploitation des lignes en service - Lignes actuellement en construction*, Paris : Le Génie civil, p10.

<sup>2</sup> Ibid., p11-12.

<sup>3</sup> Ibid., p12.

L'opposition entre l'Etat et la Ville s'exprima jusque dans la conception des voies de la première ligne, volontairement très étroites de manière à ce qu'aucun raccordement avec des lignes régionales ne fut possible<sup>1</sup>.

### *Introduction*

Le choix du courant alternatif pour la distribution de l'énergie électrique et la découverte des moteurs à champ tournant ont-ils signifié la fin de l'utilisation des moteurs à courant continu ? C'est ce que nous allons tenter de voir maintenant en nous intéressant à l'utilisation des moteurs électriques dans les tramways, qui furent les premières lignes de chemins de fer électrifiées, avant que ça ne soit le tour des lignes interrégionales.

Avant cela, il nous faut rapidement faire la distinction entre deux types de véhicule électrique. En 1907, nous trouvons chez le journaliste scientifique Henri de Graffigny la distinction suivante entre véhicules dépendants du réseau d'énergie et véhicules autonomes :

« 1° Voitures autonomes

Voitures portant leur générateur de courant et roulant sur routes.

Tramways roulant sur voies ferrées.

Locomotives et automotrices portant leur source d'énergie.

2° Voitures dépendantes

Tramways à prise de courant sur fil aérien par trôlet ou archet.

Tramways à prise de courant souterraine (caniveau) ou au niveau du sol.

Locomotives électriques à contacts au niveau du sol ou ligne aérienne.

Tracteurs à effet d'induction.

Les véhicules de la première catégorie sont complètement indépendants et constituent la classe des électromobiles transportant leur provision d'énergie dans des batteries d'accumulateurs ; les autres sont en relation constante avec une usine centrale qui leur transmet le courant. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid., p13.

<sup>2</sup> Henri de Graffigny (1907), *La locomotion électrique*, Paris: Librairie des publications populaires, p11.

Cette distinction est très importante lorsque l'on parle de moteurs électriques puisque jusqu'à aujourd'hui, le succès commercial des véhicules électriques autonomes n'est pas encore assuré. Ici nous nous intéresserons aux véhicules dépendants. Nous allons voir que le choix du type de courant utilisé dans la distribution de l'énergie électrique eut un effet sur la construction des moteurs électriques et la prévalence de l'usage d'un certain type, car au moment où les chemins de fer s'électrifièrent, les premières centrales avaient déjà été construites.

*a) Une première norme commune : les moteurs à courant continu. Excitation des moteurs à courant continu avec électro-aimants*

*1. Distance seuil*

Nous avons vu que lorsque le transport de l'énergie se faisait à grande distance, l'usage de courants alternatifs à haute tension, obtenue grâce aux transformateurs, était la solution la plus économique. Cependant, selon l'ingénieur électricien nord-américain Louis Bell<sup>1</sup>, quand la centrale distribuait du courant à une distance modérée, c'est-à-dire quand les hautes tensions n'étaient pas forcément requises, il était préférable d'utiliser du courant continu et d'investir dans plus de cuivre plutôt que dans des transformateurs, car ces derniers se détérioraient plus vite que les câbles en cuivre. Les dépenses de premier établissement et l'efficacité du système étaient alors les mêmes que celles en rapport avec l'achat d'alternateurs et de transformateurs<sup>2</sup>. Devant les membres de la *National Electric Light Association*, Louis Bell proposait ainsi de prendre en compte les conditions locales d'installation et de s'y adapter : « It is the concrete rather than the abstract that we have to consider when proposing apparatus on which the success of large commercial affairs depends (...). »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Louis Bell, « Power transmission for central stations », *Proceedings of the National Electric Light Association*, Fév. - Mars 1893, p151 à 166.

<sup>2</sup> Louis Bell, *Proceedings of the National Electric Light Association*, Février 1892, p139-140.

<sup>3</sup> Louis Bell, Fév.- Mars 1893, *ibid.*, p165-166.

En 1898, cinq ans après la prise de parole de Louis Bell, Herbert Wagner fit une présentation devant la même association sur le même thème<sup>1</sup>. Il rappelait que depuis 1895, les centrales nouvellement installées distribuaient du courant alternatif polyphasé. Cependant, les anciennes centrales électriques, dont la zone de desserte n'était pas gigantesque, distribuaient encore du courant continu. Dans ce cas, pour lui comme pour d'autres, le système en courant continu de Thomas Edison restait le plus intéressant. Il précisait : "I may startle many by stating frankly the discouraging fact, which has been barely whispered at times, that, judged by the standards of the magnificent Edison properties in many of our larger cities, few alternating-current central stations in the United States have been a success"<sup>2</sup>. Herbert Wagner reprenait l'argument selon lequel le principal défaut des distributions en courant alternatif résidait non pas la distribution elle-même, économique, mais dans les usages du courant. Ainsi jusqu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le type de moteurs le plus utilisé dans le domaine de la traction sur voies ferrées, canaux et routes était le moteur à courant continu.

## *2. Tension limite en courant continu*

Avec les moteurs à courant continu utilisés dans les tramways, on limitait la tension à 500 ou 600V maximum pour ne pas produire trop d'étincelles sur le commutateur. Cette tension était un peu plus élevée que celle utilisée pour l'éclairage (100 ou 110V). Henri Maréchal donna l'évolution suivante des basses tensions :

« Au début des applications de l'électricité à l'industrie on avait établi une délimitation assez nette entre les courants à basse tension et ceux à haute tension. On rangeait dans les premiers tous ceux que l'on pouvait distribuer sans aucun danger pour les personnes (jusqu'à 100 et 110 volts) et, dans les seconds, des courants que l'on produisait spécialement pour des transports de force ou pour des distributions d'énergie par transformateurs statiques et dont la tension atteignait 2 000 à 3 000 volts.

Mais des limites aussi étroites ne pouvaient subsister longtemps et l'application à l'éclairage de la distribution à deux fils (220 volts) et de celle à 5 fils (440 volts) montra que de telles tensions étaient aussi pratiques que des tensions à 110 volts.

---

<sup>1</sup> Herbert Wagner, "General Distribution from Central Stations by Alternating Currents", *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1898, p135.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p136.

Enfin, quand survinrent les tramways électriques, la limite fut encore reculée et l'on fit rentrer dans les basses tensions les tensions de 5 à 600 volts auxquelles on les alimentait. »<sup>1</sup>

*a) Intérêt de la distribution à trois fils*

Dans une distribution en courant continu à trois fils pour ligne de tramway, dit système Edison, deux dynamos reliées en série produisaient chacune une tension de 500 V. Etant reliées en série, leurs tensions s'additionnaient et au total elles produisaient un courant de 1000 V. L'avantage de la distribution à trois fils était de pouvoir produire une tension double de la tension nécessaire au moteur. Sur les lignes de chemin de fer à une voie, c'est-à-dire un sens de circulation, les deux dynamos étaient utilisées en alternance sur la ligne découpée en sections : sur une portion d'une certaine distance, une dynamo fournissait les 500V, et sur la portion d'après de la même distance, c'était la seconde dynamo, et ainsi de suite.

Sur les lignes de chemin de fer à deux voies (deux sens ou deux directions de circulation), une dynamo fournissait les 500 V à une voie, la seconde à l'autre voie, chacune des voies étant reliées au fil conducteur commun aux deux dynamos.

*b) Système de distribution en série*

Une autre solution était la distribution du courant continu en série, où tous les appareils, les dynamos ainsi que les moteurs, étaient reliés en série. Cette distribution correspond au système défendu par Gustave Cabanellas et mis en application par l'ingénieur suisse René Thury. La contrainte était que les moteurs étaient dépendants les uns des autres et devaient fonctionner dans les mêmes conditions.

Dans une telle distribution, le circuit forme une boucle et la tension du courant est la même aux bornes de chaque machine connectée, moteurs ou dynamo de la centrale. Cela permettait de choisir la tension du courant au niveau de la centrale à un niveau relativement bas, 500V par exemple. En revanche l'intensité du courant devait être élevée dans une distribution en série. S'il fallait augmenter la puissance fournie au niveau de la centrale, il fallait maintenir la

---

<sup>1</sup> Henri Maréchal (1904), *Les chemins de fer électriques*, Paris : Librairie polytechnique Ch. Béranger, p19.

valeur de la tension et augmenter l'intensité fournie<sup>1</sup>. Cette solution étant pratique et peu chère quand la tension ne dépassait pas un certain seuil, elle fut mise en application avec succès.

### *3. Avantage des moteurs à courant continu excités en série*

Nous avons vu que les moteurs les plus utilisés dans les transports jusqu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle étaient des moteurs à courant continu. En plus de fonctionner avec du courant continu, ils étaient d'un type particulier, dit moteur série. Pour comprendre la spécificité de ce type de moteur, rappelons que dans un moteur à courant continu, les électro-aimants devaient recevoir du courant, qui pouvait soit être produit directement par le moteur lui-même, soit par une autre machine<sup>2</sup>. Dans ce dernier cas, on parlait d'excitation indépendante de la machine. Lorsque les électro-aimants étaient aimantés grâce à un courant venant du moteur lui-même, on parlait d'auto-excitation. Il existait trois types d'auto-excitation, que l'on différenciait par la quantité de courant que recevait l'inducteur :

« (...) L'auto-excitation peut être faite en série, c'est-à-dire en faisant passer dans le fil de l'électro-aimant la totalité du courant de la machine (...).

Elle peut aussi être faite en dérivation (...), c'est-à-dire en n'envoyant au fil de l'inducteur qu'une partie du courant de la machine.

Elle peut enfin être faite à la fois en série et en dérivation (...); on l'appelle alors excitation *compound*. »<sup>3</sup>

Avec les moteurs à excitation série, plus la charge supportée par le moteur augmentait et plus le champ magnétique s'intensifiait et donc plus le moteur était en condition pour supporter de fortes charges. En cas de surcharge cependant, la vitesse du moteur cessait d'augmenter. Il était donc nécessaire de connaître à l'avance la charge supportée par le moteur. Dans les moteurs excités en dérivation, la vitesse était à peu près constante quelle

---

<sup>1</sup> Sidney H. Short, « Why is Electricity not Used for Car Propulsion ? », *Street Railway Journal*, 1888, p114 – 116.

<sup>2</sup> Edouard Hospitalier, « Nouvelle machine dynamo-électrique de M. de Méritens », *La Lumière Electrique*, n°7, 1<sup>er</sup> avril 1880, Volume 2, p135.

<sup>3</sup> Félix Benjamin Lucas (1892), *Traité pratique d'électricité, à l'usage des ingénieurs et des constructeurs*, Paris : Librairie polytechnique Baudry et Cie, p330-331.

que soit la charge. Dans les moteurs à excitation compound, que l'on nommait également excitation mixte, les avantages des deux précédents modes d'excitation se cumulaient.

Entre 1881 et 1914, la plupart des moteurs utilisés dans le domaine des transports étaient des moteurs à courant continu excités en série car, au démarrage, l'intensité du courant était maximale<sup>1</sup>. Le couple d'un moteur étant proportionnel à l'intensité du courant qui le traverse, « on peut donc dire également que, *dans un moteur à courant continu excité en série, le couple, au démarrage, est maximum*. C'est là un avantage merveilleux des moteurs électriques et il est d'autant plus précieux, pour la traction des chemins de fer, que c'est justement au démarrage qu'il faut développer le plus grand effort, ce dernier pouvant être facilement 15 à 20 fois plus considérable que l'effort normal, après mise en marche. »<sup>2</sup>

Pour pouvoir remplacer ce type de moteur par des moteurs à courants alternatifs, il fallait que le moteur électrique puisse conserver cette propriété de pouvoir développer un couple élevé au démarrage car sur une ligne de tramways, les arrêts sont fréquents, par conséquent les démarrages aussi.

## *b) Passage au courant alternatif*

### *1. Moteurs à courants polyphasés*

Dans un tramway, le moteur à champs tournants de Nikola Tesla construit en 1888 avait un rendement équivalent aux moteurs à courant continu<sup>3</sup>. Néanmoins, le démarrage, l'arrêt et la régulation du travail fourni n'étaient pas aussi simples que pour un moteur continu série. Il fallait avoir recours à un artifice : l'ajout, dans le cas du démarrage, ou le retrait, pour l'arrêt, de résistances sur le circuit du rotor. Henri Maréchal explique : « En mettant des résistances en circuit avec le rotor on augmentera le couple de démarrage et on se rapprochera, par conséquent, des conditions de démarrage des moteurs à courant continu. (...) Pour obtenir l'arrêt on insérera sur le

---

<sup>1</sup> Edouard Hospitalier (1902), *L'Electricité à l'Exposition de 1900*. 7. *Les moteurs électriques et leurs applications*, Paris : Dunod.

<sup>2</sup> Henri Maréchal, *ibid.*, p310.

<sup>3</sup> A. Hess, *ibid.*, p46.

rotor les mêmes résistances, que pour le démarrage, mais en sens inverse, après quoi on interrompra le courant. »<sup>1</sup>

L'autre inconvénient des moteurs à champs tournants par rapport aux courants continus était qu'ils consommaient plus de courant quand ils étaient à l'arrêt que des moteurs à courant continu dans le même état. La solution de Louis Bell était de les éteindre<sup>2</sup>.

Malgré ces contraintes, qui pouvaient donc être contournées, l'intérêt des moteurs à courants polyphasés se situait au niveau du transport du courant, qui pouvait être transporté plus économiquement à longue distance sous forme de courant alternatif. Avec le courant continu, les pertes étaient plus importantes passée une certaine distance<sup>3</sup>.

## *2. Recyclage des alternateurs : les moteurs synchrones ou à champ constant*

Les recherches se portèrent également sur d'autres types de moteurs à courants alternatifs. Les moteurs à courants polyphasés pouvaient en effet être de deux types, selon que le courant nécessaire pour activer les électro-aimants passait de la ligne aux électro-aimants par *conduction*, via un commutateur, comme dans les moteurs à courant continu, ou par *induction* c'est-à-dire sans liaison électrique, comme dans les moteurs à champ tournant de Nikola Tesla<sup>4</sup>. Nous nous sommes intéressés jusqu'ici aux moteurs du second type, nous nous intéressons ici aux moteurs à courants alternatifs avec commutateur. Comme les dynamos à courant continu, de telles machines étaient réversibles : une même machine pouvait soit fonctionner comme génératrice, soit comme moteur. Elles étaient construites comme la machine de la compagnie l'Alliance précédemment décrite, dans laquelle on avait remplacé les aimants permanents par des électro-aimants. Elles pouvaient recevoir du courant alternatif monophasé ou polyphasé.

---

<sup>1</sup> Henri Maréchal, *ibid.*, p335-336.

<sup>2</sup> Louis Bell, Fév. - Mars 1893, *ibid.*, p151 à 166.

<sup>3</sup> Henri Maréchal, *ibid.*, p33.

<sup>4</sup> Edouard Hospitalier (1902), *ibid.*, p30.

La différence entre ce type de moteurs et les moteurs à courant continu résidait dans la construction de l'induit et des électro-aimants, qui devaient être en tôles lamellées<sup>1</sup>. Le but d'une telle construction était d'éviter les courants de Foucault<sup>2</sup>. L'entreprise *Schneider et Cie* présenta ce modèle de moteur lors de l'Exposition universelle à Paris en 1900.

Comme dans le cas du courant continu, dans le domaine de la traction, ces moteurs étaient excités en série c'est-à-dire que l'intégralité du courant reçu allait dans les électro-aimants, après avoir été transformé en courant continu. L'inconvénient était que pour obtenir l'excitation des électro-aimants inducteurs, il fallait soit utiliser une autre machine, soit redresser le courant alternatif fourni au moteur au moyen d'un commutateur avant qu'il n'arrive dans les électro-aimants. Le recours à un commutateur ou à une machine auxiliaire rendait son usage presque aussi compliqué que celui d'un moteur à courant continu. Car comme dans le cas du courant continu, l'inconvénient principal de ces moteurs était les étincelles au niveau du commutateur<sup>3</sup>. C'est la nature même du courant alternatif, associée au fait que la construction de ces moteurs était calquée sur la construction des dynamos en courant continu, qui posait problème.

L'autre inconvénient était qu'ils devaient « tourner synchroniquement avec la machine génératrice »<sup>4</sup>. Ce synchronisme entre la génératrice et le moteur était difficile à maintenir dans les transports, la variation de charge étant telle que le moteur risquait de se désynchroniser souvent.

Pour toutes ces raisons, on estimait qu'il était plus sûr d'utiliser pour les chemins de fer des moteurs à courant continu série ou des moteurs à champs tournants, asynchrones.

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> W.-C. Rechniewski, « Moteurs électriques à courants alternatifs », *La Lumière Electrique*, Volume 32, 1889, p301 à 306, p303.

<sup>3</sup> Ibid.

<sup>4</sup> Ibid.

### 3. Recyclage des moteurs à courant continu : les moteurs monophasés asynchrones

Le synchronisme étant le plus gros défaut des moteurs à courants alternatifs avec commutateur comme moteurs de traction, une solution était de supprimer la liaison avec le commutateur juste après le démarrage. Ils pouvaient ainsi démarrer tout seul et rester synchronisés avec la génératrice ensuite. Ces moteurs, appelés moteurs à réaction de l'induit, pouvaient être construits comme les moteurs précédemment décrits, avec une différence cependant : une fois que le courant alternatif était redressé, que les électro-aimants étaient activés et que le moteur avait atteint une vitesse suffisante, le commutateur était déconnecté et l'induit se retrouvait fermé sur lui-même, comme dans un moteur à induction de Nikola Tesla<sup>1</sup>.

Elihu Thomson construisit des moteurs asynchrones à réaction de l'induit<sup>2</sup>. La construction de son moteur était basée sur les expériences qu'il présenta lors de l'Exposition universelle en 1889 et qu'Edouard Hospitalier faisait remonter à 1884 lors de l'Exposition de Philadelphie, où Elihu Thomson avait également présenté un prototype de sa machine<sup>3</sup>. Son inconvénient était qu'il fallait lui donner une impulsion de départ pour qu'elle puisse atteindre sa vitesse normale. Il utilisait pour cela un autre petit moteur à aimants permanents. D'origine anglaise mais ayant fait toute sa carrière aux Etats-Unis, Elihu Thomson faisait partie des pionniers de l'industrie électrotechnique, avec 700 inventions à son actif<sup>4</sup>. Il est l'un des co-fondateurs de la *Thomson-Houston Electric Company*.

En 1903, George Westinghouse construisit et expérimenta un moteur du même type<sup>5</sup> sur la ligne de chemin de fer Washington-Baltimore-Annapolis. Il avait tout intérêt à disposer d'une large gamme de moteurs de traction fonctionnant à courant alternatif puisqu'il construisait des systèmes de production, transport et distribution fonctionnant avec ce type de courants :

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> A. Potier, « Appareils du professeur Elihu Thomson », *Exposition universelle internationale de 1889 à Paris. Rapports du jury international*, Paris : Imprimerie nationale, 1892, p509.

<sup>3</sup> Edouard Hospitalier, « Répulsions et rotations électrodynamiques. Expériences de M. Elihu Thomson », *La Nature*, 1889, 2<sup>ème</sup> semestre, p145.

<sup>4</sup> H. Vigneron, « Nécrologie d'Elihu Thomson », *La Nature*, 1937, 1<sup>er</sup> semestre, p480.

<sup>5</sup> Moteur asynchrone monophasé à réaction de l'induit.

« Tout récemment encore, les moteurs à courant alternatif simple étaient considérés comme impropres à la traction, ne pouvant démarrer sous charge. Mais la Cie Westinghouse vient d'appliquer sur la ligne d'Annapolis, (...) un moteur nouveau, jouissant de cette propriété remarquable de se comporter à peu près comme un moteur à courant continu. »<sup>1</sup>

Le courant alternatif « simple » ou monophasé pouvait être distribué au moyen d'un seul conducteur aérien, le retour du courant se faisant par les rails alors que pour la distribution des courants triphasés, deux fils conducteurs étaient nécessaires<sup>2</sup>.

Maurice Leblanc, président de la *Société Internationale des Electriciens* en 1906, pensait que toutes ces recherches sur les moteurs à courant alternatif de traction étaient vaines et soupçonnait que les constructeurs de matériel électrique trouvaient plus intéressant économiquement de transporter le courant en monophasé plutôt qu'en continu, car les moteurs en courant continu étaient trop robustes et trop facilement réparables. Une forme d'obsolescence programmée semblait donc déjà être à l'œuvre :

« La matériel électrique ayant le grand défaut, du point de vue des constructeurs, de s'user très peu et d'être facilement réparable par les exploitants, il a fallu trouver un nouveau débouché et l'on s'est préoccupé de multiplier les tramways interurbains. Comme on ne pouvait le faire économiquement avec du courant continu à tension constante, on a eu recours à l'alternatif monophasé. »<sup>3</sup>

#### 4. Le meilleur des deux types de courant avec le convertisseur rotatif (1894)

L'alimentation des chemins de fer en électricité se faisant le plus souvent en courant alternatif car c'était la forme la plus économique pour transporter l'électricité sur de longues distances<sup>4</sup>, l'ingénieur états-unien Charles Bradley, ami de Louis Bell, inventa une machine qui transformait les courants alternatifs polyphasés en courants continus de 500 V<sup>5</sup>. Son

---

<sup>1</sup> Henri Maréchal, *ibid.*, p304.

<sup>2</sup> Henri Maréchal, *ibid.*, p8 et p17. Henri Maréchal explique que dans la distribution du courant triphasé, il n'y a pas besoin de conducteur pour le retour du courant. Les rails peuvent donc venir s'ajouter aux deux fils conducteurs pour la distribution du courant.

<sup>3</sup> Maurice Leblanc, « Allocution du président de la Société Internationale des Electriciens », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1906, p211 à 217, p213.

<sup>4</sup> M. de Valbreuze, « L'électrification des chemins de fer », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1911, 1<sup>er</sup> semestre, p317.

<sup>5</sup> Louis Bell, Fév. - Mars 1893, *ibid.*

rendement à pleine charge était de 95%. Dès qu'il s'agissait de transporter le courant sur de longues distances et de l'appliquer aux chemins de fer, Louis Bell prédisait que c'était cette machine qui devait être le plus utilisée, en expliquant que si son usage n'était pas encore répandu en février 1893 c'était parce que la demande n'était pas encore prête.

Ces transformateurs, appelés « convertisseurs rotatifs »<sup>1</sup>, recevaient le courant alternatif d'une centrale éloignée, et le transformaient le long des voies en courant continu pour la distribution aux moteurs. Ils étaient constitués d'un moteur synchrone, dans lequel passait le courant alternatif, et dont le mouvement activait une dynamo qui générait à son tour un courant qui était cette fois continu<sup>2</sup>. L'intérêt pour le convertisseur rotatif était grand puisqu'« (...) il permettait donc de garder le continu là où il avait été établi comme mode de distribution, tout en adoptant l'alternatif comme mode de transport à distance. »<sup>3</sup>

Lors de l'électrification de ses lignes en 1912, la *Compagnie générale des omnibus de Paris* eut recours à cet équipement<sup>4</sup>.

Le courant était produit dans trois centrales principales situées à la périphérie de la capitale : à Saint-Denis, à Vitry sur Seine et à Billancourt. La centrale de Saint Denis appartenait à la *Société d'Electricité de Paris*, celle de Vitry à la *Thomson Houston Electric Company* et celle de Billancourt à la *Compagnie de l'air comprimé*. Saint-Denis produisait du courant triphasé à 10 000 V, Vitry et Billancourt du courant triphasé à 13 500 V. Ce courant triphasé était ensuite transformé en courant continu à 600 V pour alimenter directement les moteurs des tramways. La transformation se faisait dans 10 sous-stations. Les trois centrales principales étaient disposées en triangle autour de Paris. Si l'une d'elle était défectueuse, les deux autres pouvaient garantir l'alimentation des sous-stations. Les inondations qui eurent lieu dans Paris en 1909-1910 motivèrent la conception d'une telle architecture, car il y eut alors plusieurs interruptions de

---

<sup>1</sup> Les convertisseurs rotatifs étaient également appelés groupes « moteurs-générateurs », « transformateurs rotatifs » ou « commutatrices ».

<sup>2</sup> W. L. R. Emmet, « Distribution of Light and Power by Alternating Currents », *Proceedings of the National Electric Light Association*, Mai 1896, p109 à 128, p125.

<sup>3</sup> François Caron et Fabienne Cardot, *ibid.*, p347.

<sup>4</sup> La *Compagnie générale des omnibus de Paris* remplaça tout son matériel roulant. Il y avait au total 1 100 voitures, coûtant au total 24 millions de francs de l'époque. *Source* : « L'électrification du réseau de tramways de la Compagnie générale des omnibus de Paris », *La Lumière Electrique*, Volume 20, 2<sup>ème</sup> série, n°48, 30 novembre 1912, p272.

service du fait que certaines centrales se retrouvèrent à l'arrêt.

Avant cela, de manière plus confidentielle d'après la disponibilité des sources, dès 1900, les compagnies de tramways de la banlieue parisienne utilisèrent elles aussi les convertisseurs rotatifs. Lorsque la *Compagnie de l'Est-Parisien* passa de la traction par moteurs à air comprimé à la traction par moteurs à courant continu, elle fit construire la centrale électrique de Vitry sur Seine en 1900. Cette dernière produisait du courant alternatif triphasé, transformé en courant continu dans huit sous-stations des environs pour alimenter les moteurs des tramways<sup>1</sup>.

### *Bilan*

Selon Gilbert Simondon, tout objet technique doit s'adapter à deux types de milieu, son milieu technique et son milieu géographique. Pour appuyer cette proposition, il se sert de l'exemple d'un moteur électrique : techniquement, il transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique. Géographiquement, il peut être utilisé dans une usine ou sur des trains. Dans un cas ou dans l'autre, les contraintes d'utilisation ne sont pas les mêmes. Un moteur concret est celui qui s'adapte en même temps à ces deux milieux, technique et géographique : « La nécessité de l'adaptation non à un milieu défini à titre exclusif, mais à la fonction de mise en relation de deux milieux l'un et l'autre en évolution, limite l'adaptation et la précise dans le sens de l'autonomie et de la concrétisation. Là est le véritable progrès technique. »<sup>2</sup>

Ainsi, utilisé dans les trains, le moteur à courant alternatif triphasé était adapté à son milieu technique, à savoir le réseau de transport du courant, mais pas à son milieu géographique, avec notamment la nécessité d'avoir un fort couple au démarrage et de pouvoir gravir des pentes, d'où le maintien de l'usage des moteurs à courant continu.

## *VI. Tarification*

Dans notre recherche sur l'histoire du moteur électrique, jusqu'à maintenant, nous nous sommes intéressés à la conception de cet objet technique en vue de sa mise sur le marché. La

---

<sup>1</sup> *Le Génie civil : revue générale des industries françaises et étrangères*, 19 octobre 1901, p405.

<sup>2</sup> Gilbert Simondon, *ibid.*, p65.

question n'a pas été de savoir si le prix de l'énergie électrique était un critère dans le choix d'un modèle de moteur électrique, mais plutôt par quelle économie de moyens il était possible d'amener l'énergie électrique au moteur électrique. Nous ne nous sommes donc pas directement intéressés à la tarification, avec laquelle nous sommes plus directement sur le marché. Nous nous y intéressons ici.

## 1. Gestion publique ou privée des réseaux routiers et ferroviaires en France. Calculs d'ingénieurs

Dans un article de 2008<sup>1</sup>, François Vatin soutint l'idée avec Alexandra Bidet qu'il n'est pas possible de poser une limite claire entre le travail d'un ingénieur et celui d'un économiste, car un choix technique repose toujours sur un choix de valeur. Ils s'appuient sur la citation suivante de Max Weber, qui lui distinguait économie et technique :

« Placée par exemple devant la question de savoir si une pièce mécanique doit être faite en fer ou en platine, elle [la technique pure] prendrait sa décision – si l'on disposait de *fait* de quantités suffisantes de ce dernier métal pour obtenir le succès concret escompté – sur la base d'une seule considération : comment pourrait-elle atteindre au mieux son objectif en économisant le plus d'*efforts comparables* (par exemple de travail) dans l'un et l'autre procédés ? Mais si elle tient compte dans ses motivations, de la rareté du platine par rapport au fer – ce que chaque « technicien » a coutume de faire de nos jours déjà au stade du laboratoire chimique – elle n'a plus (dans le sens où nous l'entendons) une orientation exclusivement technique mais accessoirement *économique* »<sup>2</sup>.

Gilbert Simondon reprit cette distinction entre technique et économie pure lorsqu'il écrit :

« Il existe donc une convergence de contraintes économiques (diminution de la quantité de matière première, de travail, et de la consommation d'énergie pendant l'utilisation) et d'exigences proprement techniques : l'objet ne doit pas être auto-destructif, il doit se maintenir en fonctionnement stable le plus longtemps possible. De ces deux types de causes, économiques et proprement techniques, il semble que ce soient les secondes qui prédominent dans l'évolution technique ; en effet, les causes économiques existent dans tous les domaines ; or, ce sont surtout les domaines où les conditions

---

<sup>1</sup> Alexandra Bidet et François Vatin, « Pratique d'ingénieur et mesure de la valeur : le cas de la téléphonie », *Idées économiques et sociales*, 2008/2 N° 152, p6-16.

<sup>2</sup> Ibid.

techniques l'emportent sur les conditions économiques (aviation, matériel de guerre) qui sont le lieu des progrès les plus actifs. Les causes économiques, en effet, ne sont pas pures ; elles interfèrent avec un réseau diffus de motivations et de préférences qui les atténuent ou même les renversent (goût du luxe, désir de la nouveauté très apparente chez les utilisateurs, propagande commerciale) (...). »<sup>1</sup>

Gilbert Simondon cite ensuite la voiture, qui est l'objet d'attentes sociales plus qu'économiques trop importantes pour être une véritable source de progrès en comparaison de l'aviation, de la marine et des camions, qui lui ont transféré leurs innovations techniques<sup>2</sup>.

Selon l'interprétation d'Alexandra Bidet et François Vatin, Max Weber évoque comme seul critère retenu pour définir la technique pure l'économie de travail. A partir du moment où économie de travail et *rareté* sont pris en compte, on quitte le domaine de la technique pure pour entrer dans un autre domaine, celui de l'économie. Le travail définit la technique, alors que le travail et la rareté définissent ensemble l'économie. Economie pure et technique pure tels que définis par Max Weber sont deux idéaux-type distincts.

La thèse des deux auteurs est qu'il n'y a pas d'un côté les économistes qui s'occupent de gérer la rareté, et de l'autre les ingénieurs qui s'occupent de minimiser les quantités de travail nécessaires pour produire un bien.

En particulier, au 19<sup>ème</sup> siècle, le travail d'un ingénieur consistait à trouver le moyen de minimiser les quantités de travail nécessaires en vue de la production d'un bien. En mécanique, seule la dépense en travail avait de la valeur et permettait de faire un choix technique, voire même de fixer un tarif comme le démontra Bernard Grall.

### *a) Les ingénieurs économistes*

#### *1. De la mécanique en histoire de la pensée économique – Problématique de Bernard Grall*

L'idée développée par Bernard Grall et reprise à François Vatin est que l'origine de la pensée gestionnaire des ingénieurs se trouve dans la mécanique industrielle : « Dans cette discipline, science du perfectionnement des machines, sont en effet posées les bases du calcul optimisateur de

---

<sup>1</sup> Gilbert Simondon (2012), *ibid.*, p30.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p31.

l'ingénieur fondé sur la connaissance de fonctions liant quantités produites et dépenses, mesurées toute deux en quantités physiques. »<sup>1</sup>

Les travaux étudiés par Bernard Grall sont à la jonction entre l'économie néoclassique et la mécanique industrielle, comme ce dernier le rappelle :

« Nés entre 1800 et 1840 [les ingénieurs des Ponts et Chaussées], ils ont tous reçu l'enseignement de la nouvelle « mécanique industrielle » ; c'est parmi eux que l'on trouvera les auteurs les plus connus des économistes pour leur usage précoce de calculs et de modes de représentations similaires ou analogues à ceux des néoclassiques. »<sup>2</sup>

Plus loin, il explique :

« En conséquence, l'histoire de l' « analyse économique » ne saurait plus se suffire à elle-même, puisque des éléments explicatifs doivent être recherchés du côté de la pratique économique, telle qu'elle se dégage de l'activité quotidienne des acteurs dans l'économie concrète. Nous allons donc nous poser en épistémologues de la gestion telle que la pratiquent ou du moins telle que la conçoivent les ingénieurs du XIXe siècle, en gageant que cette perspective permettra de mieux comprendre la genèse de la pensée néoclassique. »<sup>3</sup>

Bernard Grall étudia les calculs des ingénieurs des Ponts et Chaussées afin d'y trouver des choix de valeur implicites. Il étudia la mesure de l'usure de la route par les ingénieurs des Ponts et Chaussées, le choix de la tarification des chemins de fer. Il trouva que le concept d'utilité marginale résulte de recherches sur le coût que représente une route gratuite à entretenir par l'Etat, ainsi que sur le principe que celui qui paie le fait en fonction de ses moyens sur voies ferrées. Le principe sous-jacent dans les deux cas est celui d'équité entre les citoyens, dans le premier cas obtenu grâce à l'Etat, dans l'autre, lorsque l'Etat disparaît, par le calcul de l'utilité marginale.

Il est reconnu que le concept d'utilité marginale est tiré des recherches des ingénieurs ferroviaires sur la tarification. Cependant, ce que d'autres faisaient et que Bernard Grall ne voulait pas faire était de « plaquer l'histoire de la pensée néoclassique sur l'histoire de la pensée

---

<sup>1</sup> Bernard Grall (2004), *ibid.*, p9.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p13.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p8-9.

économique des ingénieurs »<sup>1</sup>. Bernard Grall cherchait à répondre à la question suivante : « (...) Comment la rationalité *a priori* de l'économiste et la rationalité *a posteriori* qui ressort de la praxis économique de l'ingénieur ont pu finir par s'identifier ? »<sup>2</sup>. Il souhaitait mettre en lumière « les conditions dans lesquelles sont nés les écrits des ingénieurs eux-mêmes »<sup>3</sup>, à « dégager un cadre explicatif »<sup>4</sup> dans lequel ces écrits ont été faits.

## 2. Ingénierie & Comptabilité

Bernard Grall mena une riche étude de déchiffrement des calculs des ingénieurs des Ponts et Chaussées portant sur la gestion du budget d'entretien des routes et la tarification des chemins de fer. Son but était d'y trouver des choix de valeur implicites, comme on peut le faire dans tout choix technique en général. Même si ce n'est pas tout à fait la même histoire que celle que nous racontons ici, où nous nous intéressons à l'histoire des choix techniques aux débuts de l'industrie électrique, « (...) la fraction de l'économie la plus proche de la technique »<sup>5</sup> est la comptabilité/gestion. L'étude de Bernard Grall sur les travaux des ingénieurs des Ponts et Chaussées entre 1830 et 1890 en est l'illustration.

Comme il l'explique, Bernard Grall travailla sur l'histoire de la comptabilité ferroviaire :

« De notre point de vue, l'histoire de la comptabilité ferroviaire offre un intérêt particulier. Nous avons vu en effet que l'économie routière se prêtait déjà à une analyse détaillée des coûts sous leurs diverses formes et nous connaissons donc le « terreau » sur lequel a pu se développer la comptabilité ferroviaire des ingénieurs des Ponts. Du point de vue épistémologique qui est le nôtre, il s'agira de comprendre comment s'est opéré le passage de la comptabilité mécanique de la gestion routière à la comptabilité monétaire de la gestion ferroviaire. »<sup>6</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid., p9.

<sup>2</sup> Ibid., p13-14.

<sup>3</sup> Ibid., p2.

<sup>4</sup> Ibid., p3.

<sup>5</sup> François Vatin, « Mauss et la technologie », *Revue du MAUSS*, 2004/1 (no 23), p.418-433, p429.

<sup>6</sup> Bernard Grall (2004), *ibid.*, p282.

Pour « saisir l'épistémologie économique des ingénieurs des Ponts »<sup>1</sup>, il s'intéressa à la recherche de règles d'allocation du budget d'entretien des routes entre les départements, ainsi qu'à la recherche du prix de revient du bien « train » par les ingénieurs des Ponts et Chaussées en vue de sa mise sur le marché. Leur objet n'était pas la conception même du train, mais la fixation de son prix en vue de son utilisation. Voilà pourquoi il s'intéressa à leurs études comptables. On imagine plus facilement les travaux des ingénieurs qu'il étudia réalisés aujourd'hui par des économistes. D'ailleurs les Annales des Ponts et Chaussées furent créées en 1831 et soixante ans plus tard, en 1891, Clément Colson (1853 – 1939), ingénieur des Ponts et Chaussées, devint titulaire de la chaire d'économie politique de l'Ecole des Ponts.

En ce qui concerne les routes, les ingénieurs des Ponts et Chaussées recherchaient à évaluer le coût que représentait une route gratuite entretenue par l'Etat, ce qui correspondait à une situation de monopole naturel. Les recherches de ces ingénieurs étaient ici basées sur le principe d'équité entre les citoyens, obtenue grâce à l'Etat.

Dans les chemins de fer, les ingénieurs des Ponts et Chaussées ne devaient plus évaluer une dépense d'entretien mais rechercher un tarif. Le profit devenait « le concept central de l'exploitation ferroviaire »<sup>2</sup>.

Pour Bernard Grall, c'est lorsque les ingénieurs des Ponts et Chaussées étudièrent la tarification des chemins de fer qu'ils atteignirent les limites de leur travail d'ingénieur mécanicien car une fois sur le marché, la mesure mécanique de l'effet utile doit se confronter à la « subjectivité de l'acheteur »<sup>3</sup>. Lorsqu'ils recherchaient un tarif pour les chemins de fer d'intérêt local, les travaux des ingénieurs des Ponts et Chaussées ferroviaires rejoignaient ceux de leurs collègues routiers, car la logique du profit y était beaucoup moins forte : « chargé de la gestion de ces petites compagnies, l'ingénieur des Ponts est en effet redevenu le gestionnaire de la chose publique qu'il était pour l'entretien des routes »<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> Ibid., p323.

<sup>2</sup> Ibid., p262.

<sup>3</sup> Ibid., p263.

<sup>4</sup> Ibid., p275.

## *b) Calculs du budget d'entretien routier et des tarifs ferroviaires*

### *1. Introduction sur les calculs de budget d'entretien et de tarif. Coûts fixes et coûts variables*

Bernard Grall souhaitait saisir le lien entre la gestion des routes et la gestion des chemins de fer : « Du point de vue épistémologique qui est le nôtre, il s'agira de comprendre comment s'est opéré le passage de la comptabilité mécanique de la gestion routière à la comptabilité monétaire de la gestion ferroviaire. »<sup>1</sup>

Il trouva que tout calcul de rentabilité établi par les ingénieurs qu'il étudiait consistait à comparer une dépense initiale importante aux économies futures qu'elle permettait de réaliser. La dépense initiale est fixe, les dépenses futures sont variables<sup>2</sup>. Les dépenses fixes peuvent consister à construire une carrière quand il s'agit de l'entretien des routes, ou une centrale quand il s'agit de l'industrie électrique. Les dépenses variables peuvent consister au coût de transport nécessaire pour aller chercher les matériaux à répartir sur la route, ou au coût de transport de l'électricité. L'objectif est toujours de trouver un point d'équilibre où dépenses fixes et dépenses variables s'égalisent.

Bernard Grall trouva que dans le domaine ferroviaire, Claude-Louis Navier (1835) fut le premier à faire explicitement la distinction entre frais fixes et frais variables, lorsqu'il étudia la construction de ligne de chemin de fer Paris – Rouen. Il rappelle cependant que « ces frais existent depuis que l'homme réalise son activité à l'aide de « machine » »<sup>3</sup>.

Pour Navier, la fréquentation et l'entretien des voies étaient inclus dans les frais fixes et l'usure mécanique des véhicules dans les frais variables. Contrairement à lui, les ingénieurs gestionnaires qui vinrent après considéraient que la fréquentation était bien la variable clé pour saisir les frais variables.

---

<sup>1</sup> Ibid., p282.

<sup>2</sup> Ibid., p195.

<sup>3</sup> Ibid., p326.

## *2. Evaluation mécanique du budget d'entretien des routes*

Les routes étant gratuites pour les usagers, l'objectif des ingénieurs des Ponts et Chaussées n'était pas de fixer un tarif, mais d'établir le budget de leur entretien, à répartir entre les départements. Pour faire leur calcul, ils avaient à leur disposition plusieurs variables. Les routes pouvaient être évaluées en fonction de leur fréquentation, de la quantité de matériaux nécessaires à leur construction et à leur entretien, la distance à laquelle se trouvait l'approvisionnement en matériaux, le poids transporté par les véhicules, leur vitesse, leurs dimensions, le tracé de la route (en pente ou non, avec quel nombre de virages) ou encore le climat dans lequel la route se situait. Pour calculer l'effet de la vitesse des véhicules sur l'usure des routes, certaines études prenaient également en compte la nourriture des chevaux ou calculaient de leur fatigue.

Le budget d'entretien pour les différentes routes de France était distribué en fonction de la mesure de leur usure. Bernard Grall trouva que la relation de l'usure à la fréquentation des routes fut la plus étudiée des ingénieurs des Ponts et Chaussées.

Le rôle de la fréquentation était double, elle était à la fois un coût et un effet utile puisque l'objectif était que la route soit fréquentée. Les ingénieurs routiers des Ponts et Chaussées se proposaient de résoudre le problème suivant : pour une fréquentation donnée, comment faire pour minimiser l'usure de la route ? Ils parlaient ainsi d'un effet utile pour minimiser une dépense.

Pour y arriver, il y avait différentes techniques de construction et d'entretien des routes, telles que le pavage, l'empierrement ou celle proposée par Mac-Adam (1756 – 1836), où la route était passée au rouleau compresseur. La technique de Mac-Adam avait l'avantage de diminuer les dépenses en matériaux mais on lui reprocha le peu d'attention accordée à la qualité des matériaux et l'augmentation des dépenses en main d'œuvre pour l'entretien (balayage). L'intérêt du pavage était que l'entretien de la route n'était pas cher, ce qui se payait par une dépense de premier établissement plus élevée. Avec l'empierrement c'était le contraire, l'investissement de départ n'était pas très élevé mais l'entretien coûtait cher.

Le choix se faisait selon la fréquentation de la route et la qualité des matériaux utilisés. Si la fréquentation était élevée, mieux valait mettre du pavé. Si les matériaux n'étaient pas de bonne qualité, mieux valait mettre de l'empierrement.

Le mémoire de Jules Dupuit paru en 1842 et intitulé « Considérations sur les frais d'entretien des routes », fit référence auprès des gestionnaires des routes. Son mémoire était divisé en deux parties, la première consacrée à une analyse mécanique de l'usure des routes, la deuxième à la définition de règles d'allocation du budget de leur entretien.

Pour Jules Dupuit, l'usure des routes était proportionnelle à leur fréquentation. Restait à déterminer une manière de la mesurer. Elle pouvait se mesurer par le nombre de colliers c'est-à-dire de chevaux, ou par le poids transporté. Les ingénieurs des Ponts et Chaussées n'étant pas en charge de mesurer la fréquentation, les données leur étaient plus difficiles d'accès que pour les ingénieurs ferroviaires.

### *3. Evaluation statistique des tarifs sur voie ferrée. Tarif différentiel de Jules Dupuit*

Sur chemins de fer, les voies et les véhicules étaient évalués par les mêmes ingénieurs. L'avantage d'avoir la responsabilité de la gestion des véhicules était qu'ils connaissaient maintenant les quantités transportées, ce qui les aidait dans leurs calculs de tarification, à la différence des ingénieurs de l'entretien routier qui ne s'y occupaient pas des véhicules. De plus, l'industrie des chemins de fer était un peu plus normalisée que la route, même si elle ne l'était pas totalement à cause des différences de qualité du charbon, du fer et de l'acier des rails ainsi que des différences de rendement entre les locomotives.

Sous la Troisième République, l'Etat décida d'installer les chemins de fer dans toutes les régions françaises, même les moins peuplées, par équité. Comparant le réseau routier au réseau ferré, Bernard Grall releva que la machine à vapeur a permis de construire le réseau de voies ferrées beaucoup plus vite que le réseau routier<sup>1</sup>. Il y avait alors cinq grandes entreprises qui se partageaient le territoire, *Paris-Orléans* (dirigée par Charles Didion), la

---

<sup>1</sup> Ibid., p264.

*Compagnie de l'Est* (frères Pereire), la *Compagnie du Midi* (frères Pereire), la *Compagnie des chemins de fer du Nord* détenue les Rothschild, qui avaient des intérêts dans la PLM (Paulin Talabot, saint-simonien).

La justification à un tel développement du réseau était que puisque l'Etat le finançait et que l'impôt était le même pour tout le monde, le réseau devait être accessible pour tout le monde. La tarification devait répondre aux mêmes enjeux. Le choix se porta sur la tarification différentielle élaborée par Jules Dupuit, « qui tend à faire payer le client selon ses moyens et non suivant le coût du service »<sup>1</sup>. Comme l'a démontré Bernard Grall, de nombreux tâtonnements menèrent à ce choix.

#### *a) Moralisme & Mécanisme en Economie*

Dans le domaine de l'histoire de la pensée économique, François Vatin nota que deux traditions s'entremêlent, la tradition moraliste et la tradition mécaniste<sup>2</sup>. On retrouve dans la théorie économique de Jules Dupuit (1804 - 1866) ces deux influences. La tradition moraliste qui l'inspira fut l'utilitarisme<sup>3</sup>, dont on retrouve l'influence dans sa conception de la propriété, basée selon lui sur le principe d'utilité<sup>4</sup>. Jules Dupuit pensait que l'intérêt d'un propriétaire n'était pas de détruire son bien, et donc que s'en protéger coûtait inutilement<sup>5</sup>. Il faisait preuve de pragmatisme et pensait que le droit de propriété devait s'adapter à la société et à l'utilité qu'elle trouve au bien possédé. Il fallait selon lui se fier à l'expérience<sup>6</sup>. Prolongeant cette idée sur le marché, la tarification différentielle qu'il élaborait en 1844 repose sur l'idée que chacun paie en fonction de ses besoins<sup>7</sup>. Jules Dupuit l'appliqua notamment dans deux domaines, celui de la production agricole et le transport sur voies ferrées.

---

<sup>1</sup> Ibid., p275.

<sup>2</sup> François Vatin (2002), « La morale utilitaire de Jules Dupuit » in Jean-Pascal Simonin et François Vatin (éd.), *L'Œuvre multiple de Jules Dupuit. Calcul d'ingénieur, analyse économique et pensée sociale*, Angers : Presses universitaires d'Angers, p91-116, p91.

<sup>3</sup> Ibid., p91.

<sup>4</sup> Ibid., p103.

<sup>5</sup> Ibid., p105.

<sup>6</sup> Ibid., p106.

<sup>7</sup> Ibid., p111.

*b) Tarif différentiel de Jules Dupuit (1844) sur voie ferrée*

Le mémoire de Jules Dupuit paru en 1844 dans lequel il expose son idée de tarification différentielle fit référence chez les ingénieurs gestionnaires des chemins de fer à partir des années 1890. Il s'appuyait sur les travaux précédents de ses collègues ingénieurs et sur une critique de l'économie industrielle de Jean-Baptiste Say, pour qui la production tirée d'un homme ou d'une machine pouvait se définir comme une création d'utilité<sup>1</sup>.

Avant Jules Dupuit, Louis Favier considéra le cas où une nouvelle voie de communication venait en améliorer une précédente. L'utilité d'une nouvelle voie de communication était mesurée par la diminution du coût de transport qu'elle générerait par rapport à la précédente. Pour élaborer son tarif différentiel, Jules Dupuit y ajouta la somme qu'un consommateur était prêt à dépenser pour acquérir ce nouveau bien. Pour y arriver, il s'inspira de la « hiérarchie des besoins pour chaque individu »<sup>2</sup> de Jean-Baptiste Say.

En 1897, les tarifs des chemins de fer pour le transport de personnes suivaient les règles établies par Jules Dupuit cinquante ans plus tôt, et avaient les valeurs suivantes : « Les compagnies françaises demandent respectivement 10 c. à ceux de 1<sup>re</sup> classe, 7c.5 à ceux de 2<sup>e</sup> et 5c.5 à ceux de 3<sup>e</sup> »<sup>3</sup>, 7,5 centimes étant le prix moyen de bénéfice maximum.

*c) Point de vue de Léon Walras*

Léon Walras était contre le principe énoncé par Jules Dupuit qu'il fallait « demander pour le prix du service rendu non pas ce qu'il coûte à celui qui le rend, mais une somme en rapport avec l'importance qu'y attache celui à qui il est rendu. »<sup>4</sup>, qu'il trouvait injuste :

« Que ce soit l'intérêt du monopoleur d'entretenir sur le marché non plus un seul prix de vente égal au prix de revient, non plus même un seul prix de bénéfice maximum, mais plusieurs prix égaux aux

---

<sup>1</sup> Bernard Gall (2004), *ibid.*, p372.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p374.

<sup>3</sup> Léon Walras, « L'Etat et les chemins de fer. Mémoire composé en 1875 », *Revue du Droit public et de la Science politique*, Mai – juin et juillet – août 1897, [http://www.taieb.net/auteurs/Walras/etat\\_cdf.html#01](http://www.taieb.net/auteurs/Walras/etat_cdf.html#01)

<sup>4</sup> Jules Dupuit, *De l'influence des péages sur l'utilité des voies de communication*, Annales des Ponts et Chaussées, mars et avril 1849 cité par Léon Walras, « L'Etat et les chemins de fer. Mémoire composé en 1875 », *Revue du Droit public et de la Science politique*, Mai – juin et juillet – août 1897, [http://www.taieb.net/auteurs/Walras/etat\\_cdf.html#01](http://www.taieb.net/auteurs/Walras/etat_cdf.html#01)

plus grands sacrifices pécuniaires pouvant être consentis par les consommateurs, cela ne fait aucun doute ; que ce soit son droit, c'est une autre affaire. »<sup>1</sup>

Lorsque l'entrepreneur agissait ainsi, Léon Walras estimait qu'il était du devoir des consommateurs de boycotter le service :

« Vous estimez que la différence des prix n'est pas justifiée par la différence de forme des produits ; achetez en conséquence, ou, s'il vous plaît de payer non un produit réel, mais la satisfaction d'un caprice, ne vous plaignez pas. »<sup>2</sup>

Jules Dupuit, qui pouvait aller jusqu'à se montrer autoritaire dans sa démarche d'imposer le plus grand bonheur du plus grand nombre, lui aurait sans doute répondu que lui aussi cherchait à trouver la manière la plus équitable d'organiser les liens économiques entre les individus<sup>3</sup>. François Vatin de préciser : « (...) La morale de Dupuit n'est pas individuelle. Elle est aux antipodes de la conception kantienne de l'individu qui domine la pensée libérale ordinaire. Elle est sociale comme toute morale authentiquement utilitariste. »<sup>4</sup>

#### *1. Monopoles « naturels » ou « moraux », et monopoles « économiques »*

Léon Walras soutenait l'idée que la concurrence n'était pas toujours la mieux adaptée pour fournir des biens et des services au meilleur prix. Il y avait en effet selon lui deux types de biens et de services, ceux d'intérêt privé et ceux d'intérêt public. Lorsque les biens et les services sont d'intérêt privé, la situation sociale et les besoins des individus étant inégaux, la concurrence est efficace et permet aux producteurs de s'adapter aux enchères des consommateurs. Par contre, en ce qui concerne les biens et les services d'intérêt public, les besoins étant les mêmes pour tous les individus de la société, c'est à l'Etat de satisfaire ces besoins :

« (...) Les économistes se sont toujours efforcés d'assimiler les services ou produits d'intérêt public à ceux d'intérêt privé. C'est une erreur : il y a entre les uns et les autres une différence absolue. Le

---

<sup>1</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

<sup>2</sup> *Ibid.*

<sup>3</sup> François Vatin (2002), *ibid.*, p108.

<sup>4</sup> *Ibid.*

besoin des services ou produits d'intérêt privé est senti par les individus ; le besoin des services ou produits d'intérêt public n'est senti dans toute son étendue que par la communauté ou l'Etat. »<sup>1</sup>

Sa distinction entre biens d'intérêt public et biens d'intérêt privé l'amena à distinguer deux types de monopoles, « moraux » et « économiques ». Les monopoles moraux, ou monopoles naturels, sont définis comme des monopoles d'Etat dédiés à la production de biens et services, qui doivent être gratuits. Les monopoles économiques sont des monopoles qui concernent la production de biens et services d'intérêt privé. A l'inverse des monopoles naturels, les monopoles économiques étant fondés sur l'intérêt social, les produits générés doivent être vendus au prix de revient, qui correspond au prix d'équilibre où coûts et bénéfices s'annulent.

Léon Walras pensait que l'Etat pouvait également intervenir lorsqu'un marché était aux mains d'une seule entreprise et que l'entrepreneur s'était permis de fixer un prix supérieur au prix de revient. Dans cette situation, qualifiée de monopole d'Etat économique, le rôle de l'Etat était le suivant : « L'Etat interviendra soit pour exercer lui-même le monopole soit pour l'organiser de façon qu'il soit exercé sans bénéfice ni perte. »<sup>2</sup> En intervenant l'Etat devait empêcher une situation d'injustice économique de s'installer. Pour qu'il y ait justice, il fallait que le prix de vente soit égal au prix de revient, ou prix d'équilibre. L'Etat pouvait par exemple faire une adjudication, c'est-à-dire vendre un marché public, tel que celui des chemins de fer, à l'entrepreneur le plus offrant. Dans ce cas l'entrepreneur payait un fermage à l'Etat, c'est-à-dire une somme annuelle fixée à l'avance et sur un certain nombre d'années. Le matériel d'exploitation pouvait soit appartenir à l'Etat, soit appartenir à l'entrepreneur.

Léon Walras pensait également que certains cas particuliers de monopoles, comme par exemple celui où l'inventeur garde le secret de sa découverte, pouvait servir l'intérêt public ou privé tout en étant préservés de l'intervention de l'Etat.

---

<sup>1</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

<sup>2</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

## 2. Monopole économique dans les chemins de fer

Selon le type de biens ou de services que les voies de communication permettaient de transporter, Léon Walras les définissait différemment. Lorsqu'elles ne transportaient que des marchandises, les voies de communication étaient un capital productif, dans lequel il était possible d'investir son épargne. Ne pouvant pas forcer l'investissement dans un domaine moins rémunérateur qu'un autre, à moins de risquer une « perte d'utilité pour la société »<sup>1</sup>, c'était donc la libre concurrence qui devait prévaloir. Ces mêmes voies de communication se transformaient en instruments de justice et de défense nationale lorsqu'elles permettaient aux représentants de la justice ou aux armées de se déplacer. Lorsqu'une personne voyageait pour affaires, le prix du voyage se retrouvait dans le prix du bien ou service qu'il aidait à produire. Lorsqu'elle voyageait sans autre but que le voyage lui-même, la voie ferrée devenait un bien de consommation comme un autre. Certains voyages se faisaient dans l'intérêt de la société, comme ceux d'industriels ou de scientifiques se rendant aux Expositions ou aux Congrès, « devenus si fréquents grâce aux chemins de fer »<sup>2</sup>. La voie ferrée redevenait alors un service public.

Faisant la synthèse de tout cela, considérant que les transports étaient un service d'intérêt public, Léon Walras pensait que l'Etat devait intervenir, que ce soit sur chemins de fer, routes ou canaux. L'établissement et l'exploitation des voies devaient être réalisés par l'Etat, et leur usage devait lui être payé sous forme d'un péage. Voici en résumé son point de vue sur l'organisation économique des chemins de fer :

« L'Etat peut et doit intervenir dans l'industrie des chemins de fer, et cela à un double titre : 1° parce que le service des chemins de fer, en ce qui concerne les transports des services ou produits d'intérêt public, est lui-même un service public ; 2° parce que le service des chemins de fer, en ce qui concerne le transport des services ou produits d'intérêt privé, est un monopole naturel et nécessaire qui, comme monopole privé, ne serait fondé ni en droit ni en intérêt et qui, par conséquent, doit être érigé en monopole d'État économique. A ce dernier titre, le monopole des chemins de fer devrait être exercé purement et simplement, soit par l'Etat soit pour son compte, au prix de revient. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

<sup>2</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

<sup>3</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

Selon Léon Walras, la concurrence dans le domaine des voies de communication pouvait en effet mener à une situation absurde : si un réseau de voies ferrées existait déjà, quel était l'intérêt d'en construire un deuxième ? Les dépenses de premier établissement auraient alors été doubles de ce qu'elles auraient dû être :

« Cette observation prend une valeur toute particulière quand il s'agit de frais de premier établissement considérables. Alors, en effet, deux obstacles s'opposent à ce que la concurrence produise ses effets ordinaires de bon marché et même à ce qu'elle s'exerce : d'abord la difficulté de trouver des capitaux, et ensuite celle de rémunérer ces capitaux. »<sup>1</sup>

Léon Walras critiqua à nouveau l'économie politique libérale en ces termes : « (...) La méthode scientifique, en économie politique appliquée, est de supposer les intérêts privés clairvoyants et de se dire que, s'ils ne le sont pas d'abord, ils le deviendront par l'expérience. »<sup>2</sup> Il rappela que ce fut cette méthode qui fut appliquée dans la construction des chemins de fer en Suisse et en Angleterre où les capitaux se sont précipités « en foule et sans réflexion vers cette industrie »<sup>3</sup>. Il admettait que le résultat dans la construction du réseau avait été à peu près le même que celui qui aurait été obtenu par une construction étatique du réseau, mais qu'une différence résidait dans le fait que dans la solution libérale, certains avaient gagné, d'autres perdu. Les gagnants étaient ceux qui étaient là au début, avant que les actions des compagnies de chemins de fer ne se dévalorisent, et ceux qui étaient venus après les perdants. Si tout avait été fait au prix de revient, il n'y aurait eu ni perte, ni profit : « Dans un pays où l'Etat aurait procédé comme nous l'avons expliqué, il n'y aurait eu ni bénéfices ni pertes pour personne, aucun trouble, aucune crise ; et le développement des chemins de fer continuerait à se faire de jour en jour. »<sup>4</sup>

Pour Léon Walras, si le monopole des chemins de fer avait été un monopole naturel, il aurait été dans ce cas difficile de contester les effets de la mise en place de ce nouveau mode de transport. Il explique :

« (...) Si les conditions industrielles et commerciales des villes étaient changées, ou l'existence des canaux compromise, par le seul fait de transports effectués sur les chemins de fer au prix de revient, il n'y aurait là, évidemment, qu'un effet très ordinaire du progrès technique ou économique, qui, tous

---

<sup>1</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

<sup>2</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

<sup>3</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

<sup>4</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

les jours, déplace ainsi les situations. Ou que si ces résultats se produisaient par l'effet d'une exploitation des chemins de fer faite au prix de monopole par la communauté ou l'État, en vue d'un intérêt défini, il n'y aurait encore là qu'un sacrifice de certains intérêts particuliers à l'intérêt général comme il s'en fait à chaque instant. Mais que ces conséquences aient lieu par suite d'une exploitation faite aux prix de monopole, par des compagnies particulières, pour le plus grand profit des actionnaires, c'est, en effet, une chose assez étrange, et qui a dû sembler telle au sens commun comme elle l'est réellement au regard de la science. »<sup>1</sup>

En respectant le principe du tarif au prix de revient, deux solutions se présentaient à l'Etat : soit il construisait les lignes une à une, au moment où il savait qu'elles allaient être utilisées, soit il construisait l'ensemble du réseau directement. Dans ce dernier cas, le prix de revient était plus élevé que dans le premier et les consommateurs allaient payer le service plus cher. Dans les deux cas, le prix de revient devait diminuer avec le temps car la population et les marchandises transportées allaient augmenter. Le prix de revient ayant été établi initialement sur un effectif donné, plus bas que celui atteint avec le temps, l'Etat devait nécessairement baisser son tarif à la longue, pour éviter que son « tarif de prix de revient » ne se transforme en « tarif de bénéfice ». Voilà pourquoi, selon Léon Walras, il était important de laisser le soin à l'Etat de construire le réseau, car les entreprises privées n'auraient jamais le soin de baisser leurs tarifs :

« Telles sont les deux combinaisons avantageuses entre lesquelles on peut choisir si on remet le monopole des chemins de fer à l'État : bas prix des transports ou rapide achèvement du réseau. Que si, au contraire, sous prétexte de liberté de l'industrie, on laisse ce monopole aux mains de compagnies particulières, qu'arrivera-t-il ? Ces compagnies construiront et exploiteront volontiers les lignes qui feront leurs frais ; et, quand viendra le moment où ces lignes feront plus que leurs frais, elles s'abstiendront soigneusement soit de réduire les tarifs, soit de construire et d'exploiter d'autres lignes qui ne feraient pas leurs frais en compensant les bénéfiques des unes par les pertes des autres. Le pays paiera les transports cher et verra son réseau s'achever lentement ; c'est ce qui se passe en France. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

<sup>2</sup> Léon Walras (1897), *ibid.*

## 2. Débats sur les tarifs des gestionnaires de centrales électriques aux Etats-Unis. L'efficacité des réseaux sociaux en question

### *Introduction sur les tarifs des gestionnaires de centrales électriques aux Etats-Unis*

Pour les gestionnaires de centrales électriques, l'objectif à remplir était le suivant :

« Il faut conduire chez chacun la force qu'il désire et la mesurer pour qu'il la paie, sans troubler pour cela son travail ; faire en sorte, en même temps que l'irrégularité de sa marche ne puisse gêner en rien la jouissance, libre aussi, du voisin. »<sup>1</sup>

En 1881, l'électricité se vendait à un prix fixe, peu importe la quantité d'électricité consommée. Puis petit à petit, avec les premiers compteurs, les gestionnaires de centrales devinrent capables de faire payer à leurs abonnés la quantité d'électricité réellement consommée. Les ingénieurs électriciens chargés de l'étude des tarifs cherchaient à respecter quatre conditions : établir un prix qui permette de concurrencer l'industrie du gaz et les installations autonomes, de respecter le principe d'équité envers l'abonné, d'établir un prix simple et compréhensible par l'abonné et d'augmenter l'efficacité productive de la centrale<sup>2</sup>. Dans ce dernier cas nous allons voir qu'une grande partie de la question tournait autour de l'usage des moteurs électriques, utilisés de jour lorsque l'éclairage n'était pas nécessaire et donc que les appareils de la centrale étaient inactifs.

D'emblée, la distinction entre coûts fixes et coûts variables inhérents à la gestion de la centrale fut prise en compte dans les tarifs. Du point de vue du gestionnaire de la centrale, l'objectif était de l'équiper de manière à fournir ce qui correspondait au maximum d'électricité consommé par tous ses clients, ou pic de consommation, qui ne peut avoir éventuellement lieu qu'une minute par jour. La part fixe du tarif devait couvrir ce pic. La part variable devait couvrir la puissance totale à fournir sur une année, ce qui correspondait aux charges d'exploitation.

---

<sup>1</sup> Joseph Bertrand (1883), *ibid.*, p204.

<sup>2</sup> Georges Pellissier, « La tarification de l'énergie électrique », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1898, Paris : Gauthiers-Villars et Fils, p395-415, p401-402.

## *a) Les tarifs disponibles*

### *1. Tarif sans compteur de John Hopkinson*

En 1892, l'ingénieur anglais John Hopkinson proposa un tarif où la part fixe, proportionnelle au pic de consommation, était évaluée par la puissance de tous les appareils électriques reliés à la centrale, qu'ils soient allumés ou pas. On reprocha à cette définition d'inciter les abonnés à connecter le moins d'appareil possible (des lampes principalement à l'époque) et donc d'en acheter le moins possible. Car peu importait leur utilisation réelle, ils auraient dû payer même s'ils ne les allumaient qu'une minute par jour. Ne reposant sur aucun appareil de mesure de la consommation, on reprochait aussi à son tarif de ne pas coller réellement au service fourni par le gestionnaire de la centrale, qui pouvait parfois aller au-delà du prix fixé à l'avance.

### *2. Tarif d'Arthur Wright*

Arthur Wright, ingénieur anglais, est l'inventeur d'un compteur qui mesurait à la fois le maximum de puissance consommé par un abonné, et la puissance totale consommée sur une période. Il appliqua son système pour la première fois dans la centrale municipale de Brighton, en Angleterre, dont il était le gestionnaire<sup>1</sup>. Dans son tarif, comme John Hopkinson, Arthur Wright faisait la distinction entre coûts fixes et coûts variables. Par contre, lui évaluait le pic de consommation grâce à son compteur comme étant la quantité maximale réellement consommée et correspondant au nombre de lampes allumées simultanément<sup>2</sup>, mesurée en kilowatt. La formule de son tarif s'écrivait ainsi :  $PWt = aW + bWt$ , soit  $P = a/t + b$ , où  $P$  représente le prix de vente du kilowatt-heure à déterminer,  $W$  représentait la puissance fournie au moment du pic de consommation de tous les abonnés de la centrale (en kilowatt),  $t$  représentait la durée (en heures) pendant laquelle il aurait fallu faire tourner les machines à la puissance  $W$ . Dans la formule définissant le prix de vente  $P$ , la part  $a/t$  couvrait les frais fixes et  $b$  les dépenses d'exploitation.

---

<sup>1</sup> Georges Pellissier, « La tarification de l'énergie électrique », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1898, Paris : Gauthiers-Villars et Fils, p395-415, p412.

<sup>2</sup> Henry de Graffigny (1907), *Les moteurs électriques*, Paris : Librairie des publications populaires, p148-149.

La durée  $t$ , également appelée « coefficient d'utilisation », permettait de mesurer le taux d'utilisation du matériel d'une centrale. Plus elle était élevée, meilleure était l'utilisation des équipements de la centrale. Il était également possible d'utiliser l'inverse du coefficient d'utilisation ( $1/t$ ), nommé « coefficient de diversité » et égal au rapport « Puissance fournie pendant le pic de consommation sur une période donnée (W) / Puissance totale correspondant au pic de consommation que l'usine aurait dû fournir sur cette même période ( $Wt$ ) ». Multiplié aux charges fixes par kilowatt  $a$ , le coefficient de diversité permettait d'obtenir la part fixe que devait payer chaque abonné de la centrale.  $b$  était une constante représentant les dépenses d'exploitation/kilowattheure.

Ci-dessous, les tarifs appliqués par Arthur Wright dans la centrale de Brighton, où l'on voit que la part fixe était évaluée à 73,5 centimes :

Année	Tarif (prix du kWh)	Vente (kWh)	Bénéfice (francs)	Nombre d'abonnés
1892	73,5 centimes	156 000	300	212
1893	73,5 centimes les deux premières heures puis 73,5/2 = 36,75 centimes	286 900	75 000	-
1894	73,5 centimes la première heure puis 31,5 centimes	583 701	125 000	-
1895	-	867 494	165 000	-
1896	-	1 388 871	258 000	1366
1897	73,5 centimes la première heure puis 15,75 centimes	1 992 527	355 000	1723
1898	73,5 centimes la première heure puis 10,5 centimes	-	-	-

Tableau 1 : Chiffres pour la centrale municipale de Brighton.

Source : Georges Pellissier, « La tarification de l'énergie électrique », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1898, Paris : Gauthiers-Villars et Fils, p395-415.

### 3. Tarif de William Barstow. Prise en compte de l'heure de la consommation

William Barstow, ingénieur états-unien gestionnaire de la centrale Edison située à Brooklyn, prenait en compte, comme ses collègues, les coûts fixes et les coûts variables. En plus de cela, son tarif prenait directement en compte l'heure à laquelle le courant était consommé. Il pensait que pendant les heures creuses, les abonnés de la centrale devaient payer moins cher leur électricité.

### 4. Arguments contre les tarifs au compteur

Lors d'une discussion au sein de la *National Electric Light Association* sur la question des tarifs, l'ingénieur états-unien Nicholls avança l'idée que si certains gestionnaires de centrales utilisaient encore des tarifs sans compteur en 1894, c'est qu'ils n'avaient pas d'autre choix. La raison pouvait être qu'ils avaient déjà commencé comme ça et qu'une modification aurait entraîné la perte d'une partie de leur clientèle. Une autre était que si tous les gestionnaires de centrales électriques, en situation de concurrence, ne faisaient pas le changement en même temps, alors aucun d'eux n'allait commencer à les installer car les compteurs avaient la réputation d'être moins avantageux pour les clients<sup>1</sup>. De plus, dans les cas où la quantité d'électricité consommée était faible et facilement mesurable, comme dans les boutiques par exemple, il n'y avait pas forcément besoin d'installer un compteur pour suivre la consommation, celle-ci pouvait être évaluée sans. Un autre ingénieur du nom de Scott intervint dans la même discussion que celle évoquée précédemment avec Nicholls, et expliquait ce principe à partir d'une analogie avec le réseau hydraulique : lorsqu'une compagnie d'eau fournissait une faible quantité d'eau, il n'était pas nécessaire d'installer un compteur. Par contre, quand la quantité d'eau était grande et utilisée de manière continue, mieux valait le faire. Enfin un autre argument contre les compteurs était que leur fonctionnement n'était pas toujours fiable.

---

<sup>1</sup> Nicholls, "Meters vs. Flat rates", *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1894, p336.

## b) Calcul des dépenses de premier établissement

### 1. Stockage. Analogie avec les réseaux préexistants. Fluidité des techniques

Une grande partie des dépenses de premier établissement d'une centrale électrique est liée à la ligne de transport. Nous avons vu que le débat entre courant continu et courant alternatif visait à réduire ces dépenses.

Les dépenses de premier établissement pouvaient être réduites si l'énergie électrique était stockée. L'avantage du stockage de l'électricité, que l'on considérait parfois comme étant fournie gratuitement par la nature lorsqu'elle était d'origine hydraulique, était de pouvoir ajuster la production à la consommation. Pour l'inventeur des accumulateurs, Gustave Planté, leur intérêt se trouvait là : « M. Planté en a également indiqué l'emploi pour servir de régulateur ou de *volant* dans les cas où cela eut été nécessaire. »<sup>1</sup>

Un accumulateur de centrale électrique était un réservoir d'énergie, équivalent à un ressort ou à un gazomètre dans une usine à gaz : « (...) il remplit la même fonction et joue le même rôle économique et permet de faire travailler leur matériel constamment en pleine charge, ce qui assure le maximum de rendement à la fois industriel et commercial. »<sup>2</sup>

En 1881, Werner Siemens était en faveur d'une production centralisée de l'énergie électrique par analogie avec le réseau gazier, et pensait que les accumulateurs seraient des équipements indispensables au fonctionnement des centrales électriques<sup>3</sup>. En 1884, Edouard Hospitalier faisait lui une comparaison entre le réseau électrique et le réseau hydraulique, et notait que comme le déplacement de l'eau, celui de charges électriques pouvait engendrer un effet mécanique et que c'était le potentiel de ces charges qu'il fallait stocker pour pouvoir contrôler le temps de leur usage :

---

<sup>1</sup> Paul Samuel, « Sur les travaux de M. Planté : accumulation et transformation de l'électricité voltaïque », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1885, p227 à 237, p229.

<sup>2</sup> Henry de Graffigny (1907), *La Lumière électrique : générateurs d'électricité, dynamos et alternateurs accumulateurs, distribution de la lumière, éclairage à air, éclairage par incandescence*, volume 2 in Petite bibliothèque d'électricité pratique, 10 volumes, Paris : Librairie des publications populaires, p88.

<sup>3</sup> Auguste Guérout, « Les chemins de fer électriques et la transmission de la force par l'électricité, par M. Alexandre Siemens », *La Lumière Electrique*, Volume 4, n°29, 9 juillet 1881, p42 à 45, p42.

« Le transport direct ne paraît pas être, en effet, à notre avis du moins, la solution la meilleure du problème ; il ne suffit pas de transporter une force donnée à une distance donnée d'une façon continue pour rendre le procédé économique, lors même que cette force serait relativement gratuite, autant que peuvent l'être les forces naturelles. Il est essentiel de faire une répartition convenable entre les régimes et les temps de production et de consommation, en procédant par emmagasinement. On s'expose sans cela à faire une installation insuffisante à certains moments, trop importante à d'autres, et, par suite, à une mauvaise rémunération du capital engagé dans l'entreprise, puisque l'amortissement doit se répartir sur un nombre d'heures d'utilisation limité. »<sup>1</sup>

Le problème du stockage était qu'au moment de l'élaboration des premiers tarifs, les accumulateurs étaient encore trop chers pour être utilisés par les gestionnaires de centrales<sup>2</sup>. Ainsi pour Arthur Wright, les méthodes de production de l'électricité étaient tellement différentes de celles du gaz par exemple, ou de l'eau, que les tarifs devaient nécessairement être différents aussi. La grosse différence avec le gaz ou l'eau était que l'électricité ne se stockait pas. Le stockage de l'électricité était tellement cher, qu'il était plus rentable pour une centrale de produire 1kWh et de le consommer dans la demie heure, plutôt que de répartir la consommation de ce même kWh sur dix heures ouvrées. Pour une usine à gaz au contraire, peu importait l'heure de la consommation puisque le gaz se stockait à moindre coût. Ceci étant dit, il était impossible selon Arthur Wright de faire payer le même prix pour le kWh dans les deux cas précédents. Il fallait attendre que les accumulateurs deviennent bien moins chers que les machines à vapeur ou les turbines, pour que les coûts fixes deviennent moins chers que les coûts variables<sup>3</sup>. C'est pourquoi aussi, tant que l'électricité ne se stockait pas à bas coût, il était important que l'énergie primaire, à l'époque du charbon ou de l'eau, soit bon marché. Dans ce cas, n'ayant pas le souci du déchet, peu importait que les machines tournent pendant 1 ou 10 heures pour produire le kWh demandé. Il est intéressant de noter qu'en 2016, le stockage de l'électricité par les gestionnaires de centrales paraît pour certains incontournable<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> Édouard Hospitalier, « Les transformateurs d'énergie électrique », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1, 1884, p120-121

<sup>2</sup> W. Fritsche, « Sur les stations centrales d'éclairage électrique », *La Lumière Electrique*, Volume 28, n°19, 12 mai 1888, p254.

<sup>3</sup> Arthur Wright, "Profitable Extensions of Electricity Supply Stations", *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1897, p186.

<sup>4</sup> <http://www.usinenouvelle.com/article/le-stockage-s-impose-aux-distributeurs-d-electricite-conclut-une-etude-d-accenture.N383948>

## 2. Optimisation de l'utilisation du matériel sur une période de temps donnée

a) Critique du tarif de William Barstow. Heures pleines / Heures creuses – Effet sur usages. Eclairage vs. Force motrice

Puisqu'on ne pouvait pas stocker l'électricité, il fallait gérer l'équilibre entre les dépenses de premier établissement et les prévisions de recette au mieux. Le problème avec le tarif de William Barstow était que très peu de clients consommaient de l'électricité aux heures creuses. L'équipement était mieux utilisé, mais les profits n'augmentaient pas directement. On peut supposer pourtant qu'une hausse de l'efficacité productive, telle que la soutenait Barstow, allait engendrer un moindre coût de l'électricité et donc un tarif avantageux pour les consommateurs. Voici le raisonnement exposé dans un article de 1893 dans *La Lumière Electrique* :

« Tout le monde sait que le prix de l'énergie électrique baisserait dans de notables proportions s'il était possible de faire travailler une station continuellement à pleine charge. C'est un fait en partie dû au meilleur rendement qu'offre le fonctionnement en pleine charge, de même qu'à la diminution relative des frais d'exploitation, représentés par la dépréciation et l'amortissement de l'installation et par les frais de surveillance et d'entretien.

Pour approcher autant que possible de ces conditions, il est nécessaire de vendre le courant à un prix assez faible pour inviter les consommateurs à s'en servir pendant la journée pour toutes les autres applications que l'éclairage, comme pour la force motrice, le chauffage, etc. Quant à l'emploi du courant pour l'éclairage, il est en quelque sorte forcé, et il est inutile d'en baisser le prix dans le but spécial que l'on se propose. On arrive donc à établir deux tarifs, l'un pour les heures de faible charge, avec une réduction suffisante pour encourager la consommation, l'autre pour les heures d'éclairage aux prix normaux. »<sup>1</sup>

Ainsi, faire la distinction entre tarif de jour et tarif de nuit revenait à privilégier la collecte de nouveaux abonnés, ceux qui utilisaient l'électricité non pas pour l'éclairage mais pour la force motrice ou le chauffage.

---

<sup>1</sup> A. H., « Horloge pour compteurs à double tarif », *La Lumière Electrique*, Volume 48, n°26, 1<sup>er</sup> juillet 1893, p618 à 620.

L'ingénieur français Georges Pellissier voulait bien admettre qu'il faille distinguer application diurne et nocturne par le tarif à la condition de respecter le premier commandement : établir un prix qui permette de lutter face à la concurrence. Hors la concurrence dans le domaine de la force motrice était selon lui déjà beaucoup plus chère, il n'y avait donc pas besoin de baisser le prix le jour, il était déjà plus bas qu'avec d'autres types de moteurs. Il cita le prix des ascenseurs hydrauliques, que les ascenseurs électriques sont venus remplacer, ainsi que celui des moteurs à gaz. Georges Pellissier donna les chiffres suivants : un ascenseur hydraulique pour trois personnes consommait 275 litres d'eau par course, et faisait vingt courses par jour. Le litre d'eau coûtait 0,60 franc. La dépense pour une course était de  $0,275 * 0,60 = 0,165$  franc. La dépense par jour était de  $0,165 * 20 = 3,3$  francs. La dépense annuelle liée à cet ascenseur représentait  $0,275 * 20 * 365 * 0,60 = 1200$  francs. Considérant un ascenseur électrique pour le même service, il calcula qu'il dépensait 35-40 watts-heure par course. Le kilowatt-heure coûtait 1,50 francs. La dépense pour une course était de  $0,04 * 1,5 = 0,06$  franc. La dépense journalière était de  $0,06 * 20 = 1,2$  franc. La dépense annuelle était de  $1,2 * 365 = 438$  francs. L'ascenseur électrique coûtait donc beaucoup moins cher que l'ascenseur hydraulique.

Quant aux moteurs électriques dans les usines, il écrivait :

« M. A. Soubeyran a publié des chiffres, également obtenus à Paris, qui prouvent que les moteurs électriques sont plus avantageux que les moteurs à gaz, jusqu'aux puissances de 4 à 6 chevaux, lorsque le gaz est vendu 0,30 franc le mètre cube, et le courant 0,60 franc le kilowatt-heure. L'emploi des moteurs électriques indépendants pour chaque machine-outil, ou groupe de machines, permet de plus, en supprimant les transmissions, de réaliser des économies sensibles. »<sup>1</sup>

#### *b) Critique du tarif d'Arthur Wright par Georges Pellissier*

Arthur Wright pensait que les usages de l'électricité allaient quoiqu'il arrive se développer<sup>2</sup>. La consommation diurne allait forcément devenir l'égale de la consommation nocturne, avec la traction électrique de véhicules, autonomes ou dépendants du réseau, donc il n'était pas

---

<sup>1</sup> Georges Pellissier (1898), *ibid.*, p406.

<sup>2</sup> Arthur Wright, "Profitable Extensions of Electricity Supply Stations", *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1897, p161.

nécessaire de les attirer avec une baisse de prix le jour. Il pensait que l'éclairage électrique en était à un stade trop peu développé pour que l'on songe déjà à varier les usages. De plus selon lui, certains gestionnaires de centrales négligeaient trop les petits consommateurs, or ces derniers étaient tellement nombreux que si l'électricité venait à être installée dans chaque foyer, à eux seuls ces consommateurs assureraient un bénéfice au moins aussi grand que les plus gros consommateurs (industrie, transport). La tarification était une arme tout aussi puissante que les techniques utilisées par les ingénieurs pour concevoir des centrales aussi économiques que possible<sup>1</sup>. Il remarqua par exemple qu'à en croire les graphes représentant la charge des centrales, les consommateurs d'électricité allaient tous se coucher à 20h et qu'ils n'avaient pas besoin d'éclairage artificiel à cette heure. C'est parce qu'au-delà, ils utilisaient d'autres techniques que l'électricité pour s'éclairer, qui leur revenaient moins chères. Ce pouvait être le gaz, ou les bougies. L'image qu'on avait alors de l'électricité était qu'elle était réservée aux théâtres, restaurants, boutiques, mais pas forcément appropriée pour éclairer les couloirs, les cuisines, les chambres ou les « girls' workroom »<sup>2</sup>.

Comme Arthur Wright, l'ingénieur français Georges Pellissier pensait que les coûts fixes de la centrale devaient être couverts par la puissance fournie pendant le pic de consommation mesurée par un compteur et non par la puissance totale connectée. Par contre, même s'il trouvait que la formule d'Arthur Wright était la plus rationnelle, il pensait qu'on pouvait l'améliorer en réduisant la durée d'utilisation à partir de laquelle le tarif baissait, passant de 1h à 30 min, tout en augmentant le prix des 30 premières minutes. Cela permettait à plus de monde de bénéficier du tarif réduit après une courte durée d'utilisation, tout en faisant payer plus cher aux abonnés qui n'utilisaient pas longtemps leurs appareils électriques. L'objectif était que les abonnés laissent leurs appareils allumés le plus longtemps possible, ce qui permettait de mieux amortir l'équipement des centrales.

En effet, pour une période de temps donnée, le coefficient d'utilisation des machines de la centrale était élevé quand les abonnés allumaient souvent leurs lampes, mais rarement toutes en même temps. Au contraire, un coefficient d'utilisation faible correspondait au cas où les

---

<sup>1</sup> Ibid., p163.

<sup>2</sup> Ibid., p167.

abonnés allumaient toutes leurs lampes tous en même temps. Georges Pellissier considérait que le seul inconvénient du tarif d'Arthur Wright concernait justement ce cas-là. Il trouvait que la part fixe du tarif d'Arthur Wright, qui devait couvrir la puissance fournie au moment du pic de consommation de la centrale, était sous-évaluée. Les abonnés qui ne laissaient leurs lampes allumées que 30 minutes auraient dû payer une charge fixe plus élevée que celle fixée par Arthur Wright à 73,5 centimes par jour :

« Le principal reproche que l'on puisse faire à ce système de tarification, c'est qu'il ne permet pas de faire payer une part proportionnelle assez élevée aux abonnés dont le coefficient de consommation est très faible. Ainsi, à Brighton, en 1896, 141 clients ne profitèrent pas du tarif réduit ; sur ce nombre, 74 payèrent en tout, par semestre, 1025fr, alors que seules les charges fixes qu'ils auraient dû payer atteignaient 5600fr. C'est une conséquence malheureuse du maximum trop faible de 73,5 centimes fixé par la concession. »<sup>1</sup>

Afin d'obtenir une meilleure utilisation du matériel de la centrale, Georges Pellissier recommandait que les abonnés installent « le plus grand nombre possible de lampes », dans des pièces différentes car ainsi « une partie des lampes restent allumées, tandis que les autres sont éteintes, ce qui augmente la consommation totale sans augmenter la puissance maximum »<sup>2</sup>, et qu'ils les utilisent tout au long de la journée, ce qui revenait à augmenter le coefficient d'utilisation de la centrale. De plus, les moteurs électriques permettaient de déplacer la consommation d'électricité du soir avec l'éclairage vers le jour, et donc d'obtenir un coefficient d'utilisation plus élevé. Il n'était donc pas nécessaire d'avoir recours au tarif de William Barstow et d'établir un tarif qui faisait la distinction entre consommation le jour ou la nuit pour utiliser efficacement le matériel de la centrale, celui d'Arthur Wright était déjà suffisamment incitatif :

« Les moteurs sont utilisés généralement pendant de longues heures par jour et d'un bout de l'année à l'autre ; leur coefficient d'utilisation a une valeur élevée ; avec un tarif rationnel [tarif d'Arthur Wright], ils bénéficieraient donc d'un prix très avantageux, tout en étant une source de profits considérables pour les Sociétés exploitantes. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Georges Pellissier (1898), *ibid.*, p411.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p402.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p405.

### *c) Équité vis-à-vis des abonnés*

Bien que favorable à une meilleure répartition de l'utilisation des appareils électriques tout au long de la journée, Georges Pellissier était opposé aux tarifs prenant directement en compte l'heure de consommation de l'électricité, de jour ou de nuit, de même qu'il était opposé aux tarifs prenant en compte le type d'usage, éclairage, force motrice ou chauffage, car selon lui cela n'aurait pas été juste vis-à-vis de l'ensemble des abonnés :

« Nous ne croyons pas qu'il soit juste d'agir ainsi d'une façon générale. Logiquement, il n'y a aucune raison pour vendre l'énergie électrique plus ou moins cher parce qu'elle sera utilisée dans des lampes ou dans des moteurs, puisqu'elle coûte le même prix à engendrer dans un cas comme dans l'autre. »<sup>1</sup>

Ce souci d'équité envers les premiers abonnés de l'électricité était également mis en avant dans l'industrie électrique états-unienne à la même époque. Dans un article de 2005, Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire indiquent qu'une des raisons qui poussa les gestionnaires de centrales à ne proposer qu'une seule forme de tarifs était le besoin d'équité envers les consommateurs, gros ou petits.

Les gros consommateurs avaient tendance à préférer installer leur système de production sur leur site plutôt que d'avoir recours à du courant produit par une centrale. Pour éviter cela, les gestionnaires de centrales leur offraient des tarifs spéciaux, généralement tenus secrets. Cependant, dans les petites villes, le secret n'était pas gardé longtemps ce qui pouvait décrédibiliser le gestionnaire de la centrale. Même dans les grandes villes, les gros consommateurs d'électricité se rencontraient dans des clubs ou ailleurs. Ainsi les réseaux sociaux des abonnés empêchaient les gestionnaires de centrales de faire ce qu'ils voulaient avec les tarifs. D'ailleurs, les abonnés des centrales ne tardèrent pas s'organiser sous forme de groupes institutionnels officiels. Comment expliquer que dans ce domaine particulièrement, le pouvoir des consommateurs fut d'emblée si grand ? Est-ce parce que l'électricité fut d'abord un bien de luxe, et donc que les premiers consommateurs avaient déjà un certain pouvoir ?

---

<sup>1</sup> Ibid., p405.

Notons qu'à Brighton, où le tarif appliqué était celui d'Arthur Wright et ne faisait pas la distinction entre consommation de jour ou de nuit, les abonnés de la centrale électrique n'appartenaient pas tous à la même classe sociale :

« (...) Une grande partie de la clientèle est recrutée parmi la bourgeoisie et les ouvriers, qui ont été séduits par les bas prix du courant et les avantages de l'éclairage électrique ; même dans les quartiers pauvres, l'usine a de nombreux clients qui lui procurent d'importants bénéfices. »<sup>1</sup>

Cette répartition des abonnés dans différentes classes sociales avait un effet sur pic de consommation de la centrale, et donc sur les charges fixes :

« Par suite du plus grand nombre de clients répartis dans des classes différentes, l'augmentation du débit total n'a pas entraîné une augmentation proportionnelle du matériel ; la charge maximum à l'usine n'est que les deux tiers de la somme correspondant aux demandes maxima des abonnés. Le coefficient d'utilisation de la charge maximum, qui était de 913 heures en 1892, a été, en 1896, de 1405 et, en 1897, de 1533 heures. La durée pendant laquelle les moteurs sont maintenus à pleine charge s'étend de plus en plus ; de 1895 à 1898, l'heure à laquelle la charge tombe à la moitié de sa valeur maximum, un même jour de l'année a été retardée de près de quarante minutes. »<sup>2</sup>

Les abonnés appartenant à différentes classes sociales, cela signifiait qu'ils vivaient et surtout travaillaient dans des quartiers différents dans la ville. Cette dimension géographique avait également un effet sur les dépenses de premier établissement de la centrale, qui étaient mieux rentabilisées ainsi :

« Non seulement le matériel de l'usine, mais encore les canalisations sont beaucoup mieux utilisées : le nombre de kilowatts-heures vendus par mètre de voie canalisée, qui était de 22 en 1892, a été de 39 en 1896 et de 41,25 en 1897 ; il dépassera 50 en 1898 (1). Nous ne croyons pas qu'un chiffre aussi élevé ait encore été atteint pour une ville de cette importance.

« (1) : La longueur des rues canalisées est d'environ 50km. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid., p412.

<sup>2</sup> Ibid., p412.

<sup>3</sup> Ibid., p412-413.

En France aussi, on mobilisa le concept d'équité envers les abonnés des centrales<sup>1</sup>, comme Georges Pellissier. Il considérait qu'il était injuste de faire des tarifs préférentiels à des clients plutôt qu'à d'autres :

« Si l'on vendait aux uns si bon marché que le contrat entraînât une perte, on serait conduit, pour rétablir l'équilibre, à vendre trop cher aux autres et l'on risquerait de perdre leur concours. Pour conserver des clients ruineux, on éloignerait les clients avantageux ; calcul doublement faux. »<sup>2</sup>

N'évoquant pas directement le fait que les consommateurs pouvaient communiquer entre eux et se mettre au courant de la différence des prix qu'ils payaient pour le même service, c'est-à-dire former une communauté distincte de celle des gestionnaires de centrales, Georges Pellissier comparait plutôt le groupe {Centrale électrique ; consommateurs} à une association coopérative :

« On est ainsi conduit à considérer tous les abonnés comme formant une sorte d'association coopérative dans laquelle chacun possède une portion de l'usine et des canalisations nécessaire pour répondre à ses exigences et doit payer une part proportionnelle de dépenses. »<sup>3</sup>

Et lorsqu'il mobilisait le principe d'équité, c'était non pas pour défendre le système de tarification de William Barstow, qui consistait à faire des tarifs moins chers pour les usagers de force motrice par exemple, mais celui d'Arthur Wright, qu'il considérait comme plus équitable pour les abonnés.

Dans le cas de l'électricité, l'équité consistait à empêcher les gestionnaires de centrales de faire des tarifs préférentiels aux gros consommateurs. L'équité pourrait également consister à faire payer la hausse d'efficacité obtenue grâce à une nouvelle technique à celui qui a les capacités financières d'utiliser ce surplus d'efficacité dans de nouveaux usages rentables. On pourrait imaginer dans cette logique un tarif plus élevé pour les utilisateurs de moteurs électriques anciennement utilisateurs de moteurs à gaz, au rendement moins élevé, plutôt qu'aux utilisateurs n'ayant jamais eu recours à aucun type de moteurs avant.

---

<sup>1</sup> Henry de Graffigny (1907), *Les moteurs électriques*, Paris : Librairie des publications populaires, p145.

<sup>2</sup> Georges Pellissier (1898), *ibid.*, p397.

<sup>3</sup> *Ibid.*

#### *d) Concurrence avec les usines à gaz et les centrales municipales*

##### *1. Concurrence avec les usines à gaz*

Le succès commercial de l'éclairage électrique passait par l'adoption par les centrales électriques d'un tarif séduisant pour les abonnés. Même si la forme d'énergie utilisée était nouvelle, d'autres fournissaient déjà le même service à un prix moins élevé. Offrir un tarif avantageux pendant les heures pleines était un moyen de capter une partie de la clientèle éclairée au gaz au même moment.

Dans la ville de Brighton, l'éclairage au gaz n'était pas cher et était donc un concurrent sérieux pour Arthur Wright. C'était un argument en faveur du tarif choisi par Arthur Wright, l'ingénieur de la ville, pour qui il était primordial de capter le maximum d'abonnés sans faire de discrimination sur l'heure de la consommation :

« Le charbon y coûte 25fr la tonne à pied d'œuvre ; le gaz y est vendu 12,2 centimes le mètre cube. Ces conditions rendaient difficile le succès de l'éclairage électrique et nécessitaient l'adoption de prix réduits. »<sup>1</sup>

Selon Georges Pellissier, les chiffres présentés précédemment relatifs aux tarifs de l'électricité à Brighton et à la hausse des abonnés de la centrale au fil des ans démontraient que les intérêts des gestionnaires de centrales électriques coïncidaient avec ceux de leurs abonnés :

« De tels chiffres suffisent pour démontrer ce fait que tous les directeurs de stations centrales devraient sans cesse avoir présent à l'esprit : les intérêts des abonnés et ceux des sociétés exploitantes sont tellement liés entre eux que ce qui profite aux premiers profite aux seconds. »<sup>2</sup>

Il ajoutait plus loin :

« Les résultats inespérés obtenus par l'application du tarif différentiel ont entraîné son adoption sur plus des deux tiers des réseaux anglais (70 stations) ; il est également adopté en Autriche, en Italie, aux Etats-Unis, notamment à Boston et à Chicago. Partout l'augmentation du trafic et des bénéfices a été conforme à l'expérience de Brighton. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid., p412.

<sup>2</sup> Ibid., p396.

<sup>3</sup> Ibid., p413.

Georges Pellissier citait également la ville de Worcester, en Angleterre, où les compteurs étaient prêtés gratuitement aux abonnés dont le coefficient d'utilisation dépassait une heure par jour. De plus, les lampes à incandescence étaient remplacées gratuitement au bout de 50 kilowatts-heures de consommation, ce qui représente, pour une seule lampe une durée d'allumage de mille heures. Cette consommation pouvait être répartie sur plusieurs lampes. Une autre action commerciale : « (...) on facilite par tous les moyens possibles, notamment par une entente avec des Compagnies intermédiaires, l'installation gratuite des colonnes montantes et de l'appareillage. On arrivera ainsi à rendre l'éclairage électrique beaucoup plus populaire, beaucoup de personnes étant arrêtées par la perspective des frais accessoires à payer, souvent supérieurs à ceux du courant. »<sup>1</sup>

*Exemple de « mimétisme technique » dans le domaine de l'éclairage, au gaz et électrique, par W. Schivelbusch*

Dans son ouvrage *La Nuit désenchantée*<sup>2</sup>, Wolfgang Schivelbusch repéra un processus de « mimétisme technique »<sup>3</sup> dans le domaine de l'éclairage, au gaz et à l'électricité. Depuis 1800 environ, l'éclairage se faisait principalement à partir de flammes sorties de la combustion de gaz, huile, pétrole ou stéarine (matériau dont sont composées les bougies).

L'éclairage au gaz, très répandu, était néanmoins absent des pièces luxueuses. Le risque d'incendie était son principal inconvénient, et l'abonné avait beaucoup de précautions à prendre pour le prévenir. Il fallait faire attention à ce que le bec qui brûle le gaz n'en laisse pas s'échapper. Pour cela, il fallait l'entourer d'une colonne en verre de 20 centimètres de hauteur. Le risque pouvait également venir d'une fuite au niveau du robinet de la lampe, qu'il fallait toujours refermer lorsqu'une lampe n'était pas utilisée. Il fallait aussi vérifier que le robinet principal à l'intérieur du logement était fermé lorsqu'aucun usage du gaz n'était fait. Pour l'allumage, il était recommandé de d'abord ouvrir le robinet intérieur principal, puis les robinets des lampes. Pour l'extinction, il fallait là encore éteindre le robinet intérieur principal, puis les robinets des lampes. Il fallait prendre soin de ventiler les lieux fermés éclairés au gaz. Le graissage des robinets servait aussi à prévenir les risques et surtout leur

---

<sup>1</sup> Ibid., p413.

<sup>2</sup> Wolfgang Schivelbusch (1993), *ibid.*

<sup>3</sup> Ibid.

oxydation. Si malgré toutes ces précautions, l'abonné relevait une odeur de gaz, il fallait immédiatement aérer la pièce, fermer le robinet intérieur principal, puis avvertir l'entreprise fournissant le gaz pour qu'elle puisse réparer le matériel défectueux à l'origine de la fuite.

L'éclairage au gaz avait d'autres inconvénients parmi lesquels une hausse de la température ambiante, pouvant causer suées et maux de tête, et un dégagement d'acide carbonique, d'eau, de petites quantités d'ammoniaque et de soufre. Un autre inconvénient est que le gaz s'échappe vers le haut ce qui orientait l'éclairage dans une certaine direction, pas toujours adaptée au besoin.

Puis vint l'éclairage électrique, qui garda en commun avec l'éclairage au gaz le principe de combustion :

« Le filament *carbonique*, utilisé jusqu'à la fin des années 1890, garantissait une continuité entre la lumière électrique et les techniques de lumière plus anciennes, qui étaient toutes basées sur la combustion du carbone. Pour la psychologie de la lumière, au XIXe siècle, il n'était pas sans importance de constater cette continuité, puisque grâce à elle on pouvait voir l'ancien dans le nouveau comme quelque chose de familier. »<sup>1</sup>

D'autres innovations passèrent du domaine de l'éclairage au gaz à celui de l'éclairage électrique, notamment le robinet, l'interrupteur et l'éclairage à incandescence. Lorsque Wolfgang Schivelbusch évoque le premier interrupteur électrique, qui était un interrupteur rotatif comme celui du gaz, pourtant mal adapté à l'électricité, il parle même de « régression technologique »<sup>2</sup>.

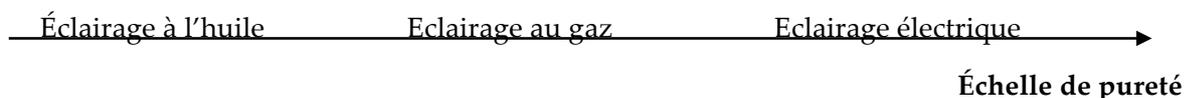
L'avantage de l'éclairage électrique était qu'il ne chauffait pas l'air de la pièce qu'il éclairait, contrairement au gaz, et rendait donc l'espace à vivre plus agréable et hygiénique. On trouvait aussi qu'il préservait les éléments de décoration en vogue à l'époque (tentures, dorures). En raison de sa proximité avec la lumière du jour, les couleurs des objets étaient

---

<sup>1</sup> Ibid., p59.

<sup>2</sup> Ibid., p66. Wolfgang Schivelbusch cita d'autres techniques anciennes modernisées par l'apparition de techniques nouvelles : la construction des voiliers améliorée par l'apparition des bateaux à vapeur ou encore la bougie avec mèche qui ne nécessitait plus de nettoyage, dont le combustible était la paraffine, issue de la distillation du charbon et plus propre.

mieux préservées qu'avec un éclairage au gaz. Et enfin, les risques d'incendie étaient bien moindres.



Dans le bâtiment de l'Exposition Internationale d'Electricité en 1881, l'entreprise de Thomas Edison disposait de deux salles pour présenter ses systèmes d'éclairage électrique avec des lampes à incandescence, qui étaient présentées sous la forme de vastes salons. L'entreprise s'adressait donc à une clientèle particulière, la plus aisée, celle qui n'avait pas toléré l'éclairage au gaz dans ses salons et qui utilisait plutôt des bougies. Pour simuler l'ambiance des salons et observer les effets de la lumière électrique, Edison avait accroché des tableaux aux murs de ses deux salles d'exposition et installé un gros lustre au centre avec plusieurs types de lampes autour, accrochées aux murs ou posées sur des tables<sup>1</sup>.

L'essor de l'industrie électrique relança les recherches dans le domaine de l'éclairage au gaz. L'objectif était de rester sur le marché en améliorant le rendement des lampes à gaz. Pour illustrer ce propos, une lettre manuscrite rédigée à Villiers-sur-Marne en 1877 nous apprend que la *Chambre syndicale de l'éclairage et du chauffage par le gaz* nomma un commissaire chargé de l'éclairage électrique. Dans cette lettre, un représentant de la Chambre qui devait rédiger un rapport sur l'éclairage électrique, demanda au directeur de la *Compagnie Parisienne de l'éclairage et du chauffage par le gaz* de lui communiquer les renseignements récoltés au cours d'expériences publiques réalisées sur l'éclairage électrique.

L'invention de l'ampoule à incandescence par Joseph Swan (1828 – 1914) et Thomas Edison inspira l'utilisation de l'incandescence dans le domaine de l'éclairage au gaz. Les industriels du gaz aussi souhaitaient maintenant porter à incandescence un matériau. Ça n'était pas du bambou comme chez Edison, mais de la magnésie pour le Français Clamond (1882) ou du

---

<sup>1</sup> C.-C. Soulages, « Exposition International d'Electricité. Les salles de l'exposition Edison », *La Lumière Electrique*, Volume 6, n°3, 21 janvier 1882, p61-62. Les toiles exposées dans l'une des salles étaient d'un peintre nommé Létorey, architecte décorateur de Sucy en Brie dans le Val de Marne et qui exposait place des Vosges à Paris. Source : A. Létorey, « Sur des tentures artistiques », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1881, 3ème série, Tome 8, p434.

tissu imprégné de sels de métaux rares pour l'Autrichien Auer von Welsbach (1885), inventeur de la technique la plus répandue de lumière à incandescence alimentée au gaz. Son procédé consistait à chauffer un manchon, la matière portée à incandescence, avec un bec Bunsen. Les entreprises gazières parvinrent si bien à améliorer le rendement des lampes à gaz que le marché de l'éclairage au gaz représenta longtemps une menace pour les industriels électriciens.

## *2. Concurrence des centrales municipales*

Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire tentèrent d'expliquer pourquoi, aux Etats-Unis, des tarifs qui ne tenaient pas compte de l'heure à laquelle l'électricité était consommée ont été mis en place. Pour eux, le système de tarification appliqué aux Etats-Unis aurait dû être celui de William Barstow, le meilleur tarif selon eux<sup>1</sup>. William Barstow privilégiait une gestion rationnelle de l'équipement de la centrale, tandis qu'Arthur Wright privilégiait la collecte de nouveaux clients de centrales électriques. Ce que les auteurs qualifient d'échec dans le choix du meilleur système de tarification s'explique selon eux par le contexte trop incertain dans lequel le choix fut fait, ajouté au fait qu'un groupe de personnes, menées par Samuel Insull, associé et homme de confiance de Thomas Edison, profita de cette incertitude pour imposer leur choix. La concurrence des centrales municipales était également un argument central dans l'article de Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire, expliquant paradoxalement que le tarif d'Arthur Wright fut choisi pour contrer cette concurrence, alors qu'il était lui-même gestionnaire de centrale municipale :

« Indeed, some of the greatest threats to central stations came from suppliers to the largest district systems, namely urban electric railways and municipal utilities. »<sup>2</sup>

Dans les centrales municipales, la nécessité de réaliser des profits élevés n'était pas si grande que celle d'une entreprise privée. Selon Arthur Wright, il fallait combattre l'idée selon laquelle l'électricité était un bien de luxe, et le fait que les municipalités s'emparent de

---

<sup>1</sup> Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire, "Electric charges: the social construction of rate systems", *Theory and Society* (2005) 34: 579-612.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p605.

l'installation de centrales électriques était le signe que cette idée n'était de toute manière pas vraie<sup>1</sup>. Les tarifs appliqués par les gestionnaires de centrales municipales étaient moins élevés que ceux gérant des centrales privées. Georges Pellissier commentait :

« Il faut remarquer, cependant, que l'exploitation, à Brighton, est faite par la municipalité ; des sociétés privées ne pourraient pas vendre aussi bon marché, car il faudrait tenir compte de la durée de la concession, des frais de premier établissement, plus élevés par suite des concours financiers qu'il faut rétribuer, des dividendes, etc., et l'augmentation paralyserait en partie le développement. »<sup>2</sup>

Les centrales municipales étaient réparties sur l'ensemble du territoire. Nous en avons trouvé un exemple pittoresque dans le *Journal de Pontarlier* du 11 avril 1897, où l'on apprend que les maires de plusieurs villages formèrent un syndicat intercommunal et demandèrent à l'Etat la concession de la chute du Fourpéret, dans le Doubs. Emile Saillard, professeur à Douai, suggéra d'y utiliser l'énergie électrique non utilisée pendant l'été pour faire fonctionner un tramway entre deux des villages. La centrale intercommunale fut construite en 1905 et mise en marche le 6 novembre 1906. En 1908, un décret du ministre de l'intérieur autorisa le syndicat intercommunal de Labergement Sainte Marie à utiliser le courant produit par sa centrale. Entretemps, d'autres communes avaient rejoint le syndicat et 10 communes étaient alimentées en électricité par la chute.

### *Conclusion – Arguments de Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire*

Dans leur explication, Patrick MacGuire, Valery Yakubovitch et Mark Granovetter donnent un rôle prépondérant aux deux associations d'industriels électriciens, la *National Electric Light Association* (NELA) et l'*Association of Edison Illuminating Companies* (AEIC). Ils présentent la NELA, fondée en 1885, comme un réseau social anti-Edison. Nous avons quand même trouvé que les membres de l'association, des gestionnaires de centrales ou des fabricants de matériel électrique l'avaient invité pour leur séance inaugurale mais qu'il ne s'était pas déplacé. L'*Association of Edison Illuminating Companies* (AEIC) fut fondée par Samuel Insull en 1885. Pour la plupart, les membres de cette association étaient des

---

<sup>1</sup> W. Fritsche (1888), *ibid.*, p251.

<sup>2</sup> Georges Pellissier (1898), *ibid.*, p413.

gestionnaires de centrales. Samuel Insull, d'origine anglaise, dirigea l'entreprise *Edison General Electric* entre 1889 et 1892. Il la quitta lorsqu'elle fusionna en 1892 avec la *Thomson-Houston Company*, avec l'appui de *JP Morgan*, et qu'elle devint *General Electric*. Cette année-là, Thomas Edison se retira de l'industrie électrique, après cette fusion, et d'après Patrick McGuire, Valery Yakubovitch et Mark Granovetter, c'est *JP Morgan* qui tint les rênes de l'entreprise. Samuel Insull devint de son côté gestionnaire de la centrale Edison à Chicago.

Du fait de la plus grande diversité de ses membres, c'est la NELA qui était l'association dominante dans l'industrie électrique. Après la fusion entre l'*Edison General Electric* et la *Thomson-Houston Company*, certains membres de l'AEIC rejoignirent cette association. En 1898, Samuel Insull devint président de la NELA, en même temps que de l'AEIC.

Samuel Insull rencontra Arthur Wright pendant les vacances de Noël 1894 puis devint copropriétaire de son système de tarification, qu'il importa aux Etats-Unis. A partir de 1898, c'est le tarif d'Arthur Wright qui fut retenu. Les institutions de régulation s'en emparèrent pour le rendre officiel. L'entreprise *General Electric*, qui vendait surtout des machines, avait acheté les droits sur le compteur et le tarif de William Barstow, que l'entreprise soutenait<sup>1</sup>.

Ce qui est étonnant pour Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire, c'est que la norme des centrales ait pris dans la production d'électricité, alors que le chauffage des immeubles, les puits d'eau ou les voitures individuelles ont pu se répandre, et que des milliers d'installations isolées ont été vendues avant que Thomas Edison n'entre sur le marché<sup>2</sup>. Ils définissaient ces installations comme des lieux de production d'électricité non uniquement dédiés à la production de courant, tels qu'un immeuble, une maison familiale, une usine ou une entreprise de tramway.

Pour Valery Yakubovitch, Mark Granovetter et Patrick McGuire, la centralisation de la production d'électricité s'expliquait par le fait que Thomas Edison et Samuel Insull étaient en

---

<sup>1</sup> Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire, "Electric charges: the social construction of rate systems", *Theory and Society* (2005) 34: 579-612, p593.

<sup>2</sup> Mark Granovetter et Patrick McGuire, "The making of an industry: electricity in the United States", *The laws of the markets*, 1998, Blackwell Publishers/ The sociological review, p152.

faveur d'une telle production et contre les installations isolées. Ils ont trouvé que les membres du cercle d'Insull étaient hostiles aux installations isolées et choisissaient dans leurs présentations que ce soit devant l'AEIC ou la NELA de trouver des arguments contre. De plus, pour Thomas Edison, les constructeurs de matériel électrique ne devaient vendre qu'aux gestionnaires de centrales et non aux installations isolées. Dans ce but, il manipula les financiers afin de se garantir des capitaux dédiés à la construction de centrales. Il organisa également une sorte de troc : fourniture de matériel électrique Edison contre titres de centrales, avec l'objectif de rendre copropriétaires de centrales le maximum d'acteurs impliqués dans l'industrie électrique.

Thomas Edison tenta de maintenir une séparation entre les producteurs d'électricité des producteurs de matériels électriques. Les membres de la NELA, avant que les soutiens de Thomas Edison ne les rejoignent, n'avaient pas la même vision de ce que devait être l'industrie électrique que les membres de l'AEIC. Pour eux, il n'y avait pas de problème avec une intégration verticale, où toutes les activités qui touchaient à l'électricité étaient incluses dans la même entreprise. Mais il n'y eut finalement pas d'intégration verticale entre producteur de courant et constructeur de matériel électrique car selon Valery Yakubovitch, Mark Granovetter et Patrick McGuire, le cercle d'Insull était contre.

Au sein de la catégorie des producteurs d'électricité, Thomas Edison souhaitait même séparer les producteurs d'électricité pour l'éclairage des producteurs d'électricité pour les moteurs. Selon eux, Thomas Edison tenait à cette séparation parce qu'il n'avait pas d'intérêt financier dans la construction de moteurs électriques. Hors selon eux les entreprises de construction de matériel électrique étaient justement favorisées par le système de tarification de William Barstow, qui encourageait l'utilisation du courant à d'autres moments que celui des heures pleines, celles de l'éclairage le soir. Les heures creuses étaient en journée, là où les ateliers et usines pouvaient utiliser les moteurs électriques. Pour Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire, c'était un argument de plus pour le soutien irrationnel du cercle d'Insull pour le tarif d'Arthur Wright.

Pourtant, on peut imaginer que favoriser la consommation de courant pendant les heures creuses aurait arrangé les gérants de centrale, en augmentant leur efficacité productive par une meilleure utilisation de leurs équipements, de même que cela aurait favorisé les constructeurs de matériel électrique en haussant les ventes de moteurs électriques, dont l'usage devenait moins cher par un prix du courant plus avantageux pendant la journée.

Cette centralisation que cherchait à expliquer Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire était de toute manière nuancée puisque comme ils le rappelaient eux-mêmes, 50% de l'électricité provenait d'installations isolées. Plus précisément, 47.4% de toute l'électricité vendue au public états-unien en 1902 venait d'entreprises de tramways (251 au total), qui utilisaient leur courant le jour et donc pouvait se permettre de le revendre le soir pour un meilleur amortissement de leur matériel. En 1907, ce pourcentage avait très légèrement diminué et s'élevait à 44.9%. Ils notèrent qu'il y avait également de nombreuses centrales de cogénération d'électricité et de chaleur. L'un des entrepreneurs américains était Homer Yaryan, qui installa des centrales dans 35 villes. Ce type de centrales était reconnu comme les étant le plus de tous. Les auteurs trouvèrent des cas d'installations isolées qui communiquaient entre elles, pour la vente de large quantité d'électricité, entre usines par exemple. Ils trouvèrent également des usines qui produisaient de l'électricité sur place et qui revendaient leur surplus pour un usage domestique ou autre. Ils indiquent aussi que jusqu'en 1918, les installations à l'échelle d'un immeuble ou d'une usine continuèrent de prospérer.

Pourquoi donc affirmer que le « cercle d'Insull », composé des hommes qui travaillèrent avec Edison entre 1882 et 1885 à New York, favorable aux centrales, avait tant de pouvoir ? On peut supposer que leur objectif était de soutenir leur argument selon lequel si les installations isolées n'ont finalement pas dominé le marché sur le long terme aux Etats-Unis, c'était à cause du tarif d'Arthur Wright, choisi et imposé par le cercle d'Insull sur la totalité du territoire, utilisé comme arme pour imposer la centralisation.

Les auteurs affirment que l'argument en faveur du tarif d'Arthur Wright consistant à vouloir augmenter les économies d'échelle de Samuel Insull était irrationnel économiquement, car la

technologie ne permettait pas encore de faire des économies d'échelle. Ils se basent sur McDonald (1962) et Hirsch (1989) pour soutenir leur propos. L'utilisation industrielle des turbines à vapeur Parsons n'eut lieu qu'au début du vingtième siècle selon eux. Pourtant, la turbine Parsons, fut inventée en 1884 et l'entreprise *Sautter-Lemonnier* obtint la première licence française en 1886, date à laquelle l'entreprise construisit son premier groupe électrogène. La construction de la turbine était détaillée dans des revues telles que *La Lumière Electrique*. Samuel Insull avait très certainement connaissance de l'existence de cette turbine du constructeur américain si *La Lumière Electrique* la décrivait déjà.

Pourquoi donc critiquer autant le choix du tarif d'Arthur Wright aux Etats-Unis et vouloir à tout prix faire de Samuel Insull et de Thomas Edison les méchants dans l'histoire ?

Pour Gabriel Tarde, il fallait « (...) expliquer l'histoire par les idées de ses acteurs et non par celles de l'historien. »<sup>1</sup> Ce n'est pas tout à fait, selon nous, ce qui ressort des travaux de Valery Yakubovitch, Mark Granovetter, Patrick McGuire. Ils ont tenté de démontrer un siècle plus tard qu'il était utile d'amasser autant de données historiques que possible, afin de connaître au mieux l'environnement d'étude. Selon eux, la démarche historique est importante pour déconstruire l'argument fonctionnaliste selon lequel chaque chose a sa fonction et est en ordre à sa place. Ils étaient donc pour l'argument soutenu par Paul David et Brian Arthur dans leur article donnant la description de l'emplacement des lettres sur les claviers, jugé inefficace. L'objectif des sociologues états-uniens est formulé clairement en ces termes :

"Our goal is systematically to analyse the particular conditions within each historical setting and consider the options and factors influencing path selection at each point of decision-making"<sup>2</sup>.

Dans leurs deux articles sur la construction sociale de l'industrie électrique, ils mettent en avant la quantité élevée de matériaux historiques consultés. Ils ont analysé que les choix techniques faits au sein de l'industrie électrique reposaient sur des réseaux d'influence. Lorsqu'ils s'intéressent au choix de systèmes de tarification de l'électricité, ils revisitent l'histoire de la manière suivante :

---

<sup>1</sup> Gabriel Tarde (1895), *Les lois de l'imitation*, Paris : Félix Alcan, p3.

<sup>2</sup> Mark Granovetter et Patrick McGuire, "The making of an industry: electricity in the United States", *The laws of the markets*, 1998, Blackwell Publishers/ The sociological review, p150.

“It is important to note that when our story took place, the economic characteristics of the two rate systems were actively debated but not yet well understood. Central station managers always justified pricing schemes with the rhetoric of economic efficiency, but our analysis suggests that such justifications had little to do with actors’ actual goals and that proponents did not make fully satisfactory arguments for either system.”<sup>1</sup>

Ils en ont conclu que les bases sur lesquelles s’est mise en place l’industrie électrique états-unienne à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle n’étaient pas vraiment rationnelles et efficaces.

William Barstow, gestionnaire de centrales, était dans le cercle d’Insull. Mais en plus de cela, il était proche des fabricants de matériel électrique qu’étaient *General Electric* et *Westinghouse*, avec qui il avait signé des accords pour produire le compteur Kapp. C’est ce dernier lien que les trois auteurs utilisent pour soutenir leur argument que le réseau social détermine le choix technique. Ce lien menaçait d’ouvrir une brèche dans l’uniformité des buts poursuivis par la communauté des gestionnaires de centrales. Samuel Insull était a priori plus puissant que William Barstow, du moins c’est ce que suggèrent les trois auteurs, donc lorsqu’une polémique s’est ouverte, elle s’est résolue du côté de sa solution à lui :

« the strongest point about the Wright demand system is the able backers it has in this country. . . . The ability of its backers exceeds the merits of the system” (Doherty 1900: 335). »<sup>2</sup>

Ne pourrait-on pas aussi suggérer que Samuel Insull était effectivement le porte-parole des gestionnaires de centrales et de leur motivation à capter le maximum d’abonnés tout en ayant le souci de la gestion efficace des équipements et donc de la maximisation des profits ? Tous avaient notamment en tête la concurrence avec l’industrie du gaz, en plus de celle avec les installations isolées et les centrales municipales. Il faut également noter qu’à Chicago, ville dans laquelle Samuel Insull gérait la centrale Edison, les entreprises de tramway et la municipalité ont failli s’associer, la centrale municipale devant fournir le courant aux entreprises de tramway<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Valery Yakubovich, Mark Granovetter and Patrick McGuire, “Electric charges: the social construction of rate systems”, *Theory and Society* (2005) 34: 579–612, p581.

<sup>2</sup> Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire, “Electric charges: the social construction of rate systems”, *Theory and Society* (2005) 34: 579–612, p597.

<sup>3</sup> Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire, “Electric charges: the social construction of rate systems”, *Theory and Society* (2005) 34: 579–612, p605-606.

Il semble nécessaire que Samuel Insull ait fait le mauvais choix pour permettre aux trois auteurs de soutenir leur argument selon lequel un choix fait par une personne intriquée dans un réseau social est nécessairement non efficace. Ce que Valery Yakubovitch, Mark Granovetter, Patrick McGuire ont démontré, c'est que l'industrie électrique, qui repose sur le concept d'efficacité, ne s'est pas construite uniquement sur cette base. Pour aller dans le sens des trois auteurs et leur faire dire ce qu'ils n'ont pas dit, ce n'est pas optimal de construire une industrie à partir d'un réseau social lorsque celui-ci n'est pas assez étendu, ce qui était sans aucun doute le cas pour le cas de l'industrie électrique. Des nœuds furent effacés de la carte, ce qui comme Bruno Latour le dirait est immoral<sup>1</sup>. Pour autant, est-on nécessairement inefficace lorsqu'on travaille en réseau ?

## C) Technique et efficacité

### *VII. Efficacité / Liberté. Prise en compte du maximum de nœuds possible dans le réseau*

#### 1. Réseau

##### *a) Epistémologie du réseau*

Il est important de penser production, transport et distribution d'énergie de manière distincte, comme trois étapes différentes. La concentration de la production nécessite la mise en place d'un réseau pour la distribution, un réseau de voies ferrées pour la distribution du charbon, de lignes à haute tension pour la distribution d'électricité. Gilbert Simondon écrivait : « Le rôle joué par les chemins de fer dans la concentration thermodynamique est remplacé par celui que jouent les lignes haute tension d'interconnexion dans l'ensemble d'électricité industrielle. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Bruno Latour (1991), *Nous n'avons jamais été modernes. Essai d'anthropologie symétrique*, Paris : La Découverte.

<sup>2</sup> Gilbert Simondon (2012), *ibid.*, p85.

Pour Pierre Musso, la « fête épistémologique du réseau »<sup>1</sup> commença au 18<sup>ème</sup> siècle. Il rappelle que Descartes puis Diderot identifièrent le corps humain et plus particulièrement le cerveau à un réseau. Le cerveau servait à faire la communication entre les organes dans le corps : au « despotisme de la mémoire », on opposait l' « anarchie de la périphérie »<sup>2</sup>. Le réseau permettait par exemple d'expliquer le fonctionnement du système nerveux, système complexe, vu comme la circulation d'un flux à l'intérieur du corps.

Dans des définitions plus anciennes, le réseau était assimilé aux soieries ou aux tissus. La notion de réseau était liée à la technique et à la notion d'ordre. Cette métaphore permettait d'expliquer l'invisible. Il régnait dans les techniques un ordre caché, dans la production du tissu par exemple, tout comme dans le fonctionnement du cerveau et du système nerveux. La glande pinéale, qui sécrète la mélatonine, et que Descartes désignait comme le siège de l'âme<sup>3</sup>, permettait de passer de la matérialité du réseau physique à la production de la pensée.

Diderot ajoutait à cette analogie avec le cerveau la métaphore politique. Dans cette métaphore, il se servait de l'image de l'araignée au milieu de sa toile qui capture sa proie. Pierre Musso précise que cette métaphore de l'araignée traversa les siècles et ne se retrouvait pas uniquement chez Diderot.

L'analogie entre corps humain et réseau fut reprise par Pierre-Joseph Proudhon, père de l'anarchisme, dans son texte de 1858 sur les chemins de fer afin de critiquer la centralisation, qu'il assimilait à un système monarchique. Un réseau devait plutôt être décentralisé, fédératif, égalitaire. Pierre Kropotkine (1842 – 1921), anarchiste aussi, pensait par exemple qu'à la place des centrales électriques, on pouvait très bien créer des petites entités familiales décentralisées<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> François Dagognet dans *Penser les réseaux* (sous la dir. de Daniel Parrochia), 2001, Éditions Champ Wlon, p191. Cité par Pierre Musso, *La raison du Réseau*. In: *Quaderni*, n°52, Automne 2003. *Secret et pouvoir : les faux-semblants de la transparence*. pp. 55-66.

<sup>2</sup> Pierre Musso (2003), *Critique des réseaux*, Editions PUF.

<sup>3</sup> Source : Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Glande\\_pin%C3%A9ale](https://fr.wikipedia.org/wiki/Glande_pin%C3%A9ale)

<sup>4</sup> Pierre Kropotkine (1910), *Champs, Usines et Ateliers, ou l'industrie combinée avec l'agriculture et le travail cérébral avec le travail manuel*, Paris : P.-V. Stock.

À partir du 19<sup>ème</sup>, on passa du réseau naturel au réseau artificiel : le pouvoir passa des mains des médecins à celles des ingénieurs et industriels. Les réseaux de transport (routes, canaux, chemins de fer, télégraphe) et les réseaux financiers en sont la représentation. Michel Chevalier, grande figure du Saint-simonisme, professeur au collège de France à la chaire d'économie politique, conseiller de Napoléon III, pilota le développement du télégraphe électrique et des chemins de fer. Avec d'autres leaders saint-simoniens, il développa les grands réseaux techniques. L'objectif était pour eux de rapprocher les hommes, réduire distance et temps, et ainsi rendre concrète la communauté universelle : « Le chemin de fer est le symbole le plus parfait de l'association universelle »<sup>1</sup>. On passait ici du réseau technique à la transformation sociale.

Pour Pierre Musso, le réseau est considéré comme une avancée technique d'un côté, une réforme sociale de l'autre. Le réseau est utilisé comme mode d'organisation de la société, vertical, d'un côté (réseau de pouvoir), et comme manière d'être, horizontal, de l'autre (réseau interindividuel). Ce double sens rend selon lui l'analyse en termes de réseau confuse. Avant on expliquait le cerveau avec la métaphore du réseau, aujourd'hui on explique la société. Cette idée fut suggérée par Norbert Elias dans la *Société des Individus*, dont le propos était que plus on vit dans une société éclatée en petits groupes, plus le réseau nous sert à expliquer les relations entre les individus. Plus on sépare, plus on cherche des liaisons<sup>2</sup>.

Pierre Musso explique également qu'une grande inversion fut introduite par Herbert Spencer : le cerveau humain est maintenant vu comme un réseau technique. On part maintenant du réseau technique pour mobiliser la métaphore corporelle. Le téléphone ou Internet seraient aujourd'hui des systèmes nerveux. Pour le Général De Gaulle, le réseau électrique, c'est la vie, et la panne du réseau, c'est la mort.

---

<sup>1</sup> Michel Chevalier (1832), *Politique industrielle et système de la Méditerranée : religion Saint-Simoniennne*, Paris, cité par Pierre Musso (1998), *Télécommunications et philosophie des réseaux*, Editions PUF.

<sup>2</sup> Pierre Musso (2003), *Critique des réseaux*, Editions PUF.

## b) Alternatives possibles au réseau électrique

### 1. Réseau hydraulique

L'un des avantages des réseaux d'énergie électrique sur les réseaux d'énergie hydraulique selon Werner Siemens était qu'avec l'énergie électrique, il était possible de prévoir à l'avance « quelle est la force nécessaire pour mettre en mouvement la machine génératrice. Dans la transmission hydraulique, au contraire, les fuites et le frottement dans les tuyaux ne peuvent jamais être déterminés d'avance. »<sup>1</sup>

L'autre avantage était que les machines électriques « ne nécessitent pas de fondations profondes. »<sup>2</sup> De plus, la perte d'énergie était moindre dans les réseaux électriques que dans les réseaux hydrauliques<sup>3</sup>. Enfin, l'avantage était que l'électricité n'ayant pas de masse, « les conducteurs peuvent être contournés sans aucune perte dans tous les sens, ce qui est loin d'être le cas pour les transmissions hydrauliques. Il [William Ayrton] espère que ce mode de transmission pourra permettre d'utiliser à distance les forces perdues de la nature, non pas celle du flux et reflux de la mer, mais celle des rivières et cours d'eau. »<sup>4</sup>

La ville de Genève fit construire une centrale hydraulique pour la distribution de force motrice dans la ville. D'après L. B. Stillwell, membre de la *National Electric Light Association*, la conception de cette centrale était remarquable<sup>5</sup>. Elle se fit sous la supervision du colonel Théodore Turrettini, collaborateur de René Thury, membre du comité en charge d'évaluer le système de distribution électrique à installer aux chutes du Niagara. Cédant aux avantages des centrales électriques, la même équipe s'occupa ensuite de construire une deuxième centrale, hydroélectrique cette fois, à quelques kilomètres de la ville, le long du Rhône, avec le même objectif d'alimenter la ville en force motrice mais cette fois non plus au moyen de l'eau directement mais de l'électricité.

---

<sup>1</sup> Auguste Guérout, « Les chemins de fer électriques et la transmission de la force par l'électricité, par M. Alexandre Siemens », *La Lumière Electrique*, Volume 4, n°29, 9 juillet 1881, p42 à 45, p42.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> Ibid.

<sup>4</sup> Ibid., p44.

<sup>5</sup> L. B. Stillwell, « Niagara Power », *Proceedings of the National Electric Light Association*, Juin 1897, p281 à 294, p289.

## 2. Réseau d'air comprimé

En plus de l'eau, de la vapeur et du gaz, on songea également à utiliser l'air sous forme comprimée ou raréfiée pour obtenir de la force motrice. A Paris par exemple, en 1886, la question de la distribution de la force motrice distribuée au domicile des ouvriers intéressait le conseil municipal. Deux systèmes furent acceptés par la municipalité parisienne, l'un distribuant de l'air comprimé, l'autre de l'air raréfié, pouvant dans chaque cas être utilisé directement dans des moteurs. Le système de distribution d'air comprimé était proposé par Victor Popp, qui fournissait déjà l'électricité pour l'éclairage de nombreux cafés et restaurants, ainsi que de la force motrice pour la *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*. Le système de distribution d'air raréfié était proposé par Petit et Boudenoot.

### c) Coopération entre les réseaux électriques et gaziers

Les réseaux ne se contentaient pas toujours d'être concurrents, ils pouvaient également être complémentaires. Dans une lettre du 9 juin 1880, le directeur de l'entreprise d'éclairage électrique *Lontin et Cie*, Emile Cauderon, suggéra au directeur de la *Compagnie Parisienne d'Eclairage et de Chauffage par le Gaz*, Camus, d'associer leurs deux entreprises : « Cela semble d'autant plus rationnel que, fort souvent, il ne s'agira que de modifier l'emploi du gaz en le transformant en force motrice, afin d'obtenir, avec la même consommation, une lumière plus considérable. »

L'idée suggérée ici était d'utiliser des moteurs à gaz pour mettre en marche les dynamos. Le directeur de l'entreprise d'éclairage électrique ajoute : « Vous comprendrez facilement qu'après avoir dû consacrer un temps énorme et des capitaux importants, non seulement pour créer et compléter notre système, mais aussi pour fournir les preuves de ses qualités, nous éprouvons aujourd'hui le désir bien naturel d'en tirer parti le plus promptement possible, et de prendre, sur la place, la situation à laquelle nous croyons avoir droit. La façon dont nous débiterons, devant dépendre de l'issue des propositions que nous vous adressons, nous fait un devoir de vous prier de bien vouloir nous faire connaître votre impression dans le plus bref délai. »

Le *Journal des usines à gaz* était également d'avis, en 1886, que les gestionnaires de centrale électrique avaient tout intérêt à s'associer avec les usines à gaz : « (...) Nous serions assez porté à dire que les Compagnies de gaz sont, en général, les seules en mesure de créer des stations centrales dans les villes où la nécessité en sera reconnue. Ce qui justifie dans une certaine mesure cette opinion, c'est que les usines à gaz où l'on s'occupe d'électricité voient immédiatement s'évanouir les projets de concurrence électrique ; en portant la lutte sur le terrain de leurs adversaires, elles les réduisent à l'impuissance. »<sup>1</sup>

La société *Westinghouse* faisait partie des entreprises d'électricité qui tentait de convaincre les compagnies de gaz de collaborer avec les compagnies d'électricité. De même, certaines entreprises gazières de Province française s'associèrent avec la *Compagnie Continentale Edison* pour la fourniture d'électricité. En 1887, elle réalisa des partenariats avec les entreprises des villes de Béziers, Clermont-Ferrand et Marseille.

Les houillères équipées de fours à coke pouvaient également produire de l'électricité, pour leur propre besoin ou qu'elles revendaient aux alentours. La cokéfaction consiste à brûler à haute température du charbon de terre, inutilisable à l'état brut par les métallurgistes, dans des fours. Cette combustion produisait du gaz, utilisé pour l'éclairage ou pour produire de l'électricité, ainsi que du goudron et du benzol<sup>2</sup>. L'histoire industrielle des fours à coke a commencé à la toute fin du 19<sup>ème</sup> siècle, bien qu'ils furent inventés bien avant. Ce développement tardif était dû, selon Paul Mallet en 1916, « à l'opposition maniaque des métallurgistes, qui prétendaient que le coke de fours ne pouvait être que de mauvaise qualité »<sup>3</sup>. Le gaz issu des fours à coke ne pouvait notamment pas être utilisé dans les moteurs à gaz car il contenait trop d'impuretés, ce qui entraînait des dysfonctionnements de ces moteurs<sup>4</sup>.

De nombreux essais furent effectués en Angleterre pour recueillir la vapeur développée par les fours à coke et l'utiliser pour produire de l'électricité :

---

<sup>1</sup> *Journal des usines à gaz*, n°121, 5 septembre 1886, p274.

<sup>2</sup> Pour le concept de sous-produit, cf. François Vatin (1987), *La Fluidité Industrielle*, Paris, Méridiens-Klincksieck.

<sup>3</sup> Paul Mallet, « Les progrès successifs dans la carbonisation de la houille au point de vue de la récolte des sous-produits, par M. Paul Mallet, ingénieur des Arts et Manufactures, ancien membre de la Chambre de commerce de Paris », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1916, 1<sup>er</sup> semestre, p93 à 116, p115-116.

<sup>4</sup> E. Cuvelette, « L'emploi des gaz des fours à coke », *Comptes rendus de la Société des Ingénieurs Civils*, 1908, 2<sup>ème</sup> semestre, séance du 4 décembre p1002 à 1004, p1002-1003.

« Les résultats en sont excellents sous le rapport de l'économie. Il n'est pas douteux que cet exemple ne soit suivi et que l'emploi de cette source de calorique ne devienne de plus en plus fréquent. Les propriétaires de houillères qui possèdent des fours à coke n'ignorent pas qu'ils perdent des quantités considérables de calorique qu'ils pourraient utiliser en plus ou moins grande partie. Il est intéressant d'entrer dans quelques détails sur les moyens à employer pour y arriver. »<sup>1</sup>

En 1897, des essais eurent lieu en France dans la centrale électrique du secteur de Clichy. Des essais infructueux car le coke était de mauvaise qualité. De plus, la fumée dégagée gêna les voisins<sup>2</sup>.

En 1916, en pleine guerre, la décision d'utiliser le gaz issu de la production de coke pour produire de l'électricité se faisait plus pressante :

« M. Simpson, a rappelé notamment qu'on produit annuellement 12 millions de tonnes de coke dans les fours à coke du Royaume-Uni. Si on pouvait récupérer tous les gaz produits, on obtiendrait un milliard de kilowatts-heure par an, ou une puissance continue de 115 000 kilowatts. De plus, les hauts fourneaux assureraient de leur côté une puissance continue de 200 000 kilowatts. Ces 315 000 kilowatts permettraient d'économiser la moitié du charbon employé actuellement pour produire de l'électricité. (...) Avec les perfectionnements apportés aux chaudières avec chauffage au gaz, on pourrait arriver à produire dans de grandes unités à vapeur l'énergie à des prix extrêmement réduits. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> « Utilisation de la chaleur perdue des fours à coke », *Comptes rendus de la Société des Ingénieurs Civils*, Octobre 1904, p526 à 529, p526.

<sup>2</sup> Auguste Lalance, « Note sur des essais d'anthracite anglais faits à l'usine du secteur de Clichy, à Paris, par M. Aug. Lalance », *Bulletin de la Société des Ingénieurs Civils*, 1897, 2ème semestre, p953-954, p953.

<sup>3</sup> Paul Mallet (1916), *ibid.*, p115-116.

## 2. Autonomie. Installations et moteurs autonomes, production et distribution décentralisée

### a) Industrie électrique & Décentralisation

#### 1. Production centralisée – Distribution décentralisée

Ce qui est intéressant avec l'énergie électrique, c'est qu'elle peut se produire de manière centralisée et se *distribuer* de manière décentralisée. Ce modèle venait concurrencer un mode de production directement décentralisé d'énergie thermique sous forme de vapeur.

En 1886, l'ingénieur électricien William Baxter citait le cas de grandes villes aux Etats-Unis où chaque manufacturier pouvait acquérir et installer sa propre petite machine à vapeur dans son atelier. Les gestionnaires de centrales électriques se plaçaient en concurrence, produisant de l'énergie électrique destinée à être utilisée dans des petits moteurs de ces mêmes ateliers<sup>1</sup>. Dans les deux cas, la force motrice était produite à partir de machines à vapeur, de manière indirecte dans le cas des centrales électriques.

William Baxter trouva que dans ces villes, il était plus économique de transformer la vapeur en électricité dans une centrale et de la distribuer à plusieurs petits moteurs électriques, plutôt que d'utiliser directement la vapeur dans de petites machines.

#### 2. Production décentralisée

Nous l'avons vu en partie B), la centralisation de la production d'électricité peut s'expliquer par la notion de pseudomorphisme culturel utilisé par Lewis Mumford et reprise à Ostwald Spengler, ou par celle d'analogie, théorisée et agrémentée d'exemples par Gilbert Simondon et Wolfgang Schilvelbusch. On peut également faire appel au problème de la mesure, ici du rendement d'une organisation par rapport à une autre. Pour Gilbert Simondon, les économies d'échelle font qu'il est toujours plus rentable d'organiser la production d'énergie quelle qu'elle soit de manière centralisée. Néanmoins, lorsque l'on considère uniquement l'énergie électrique, il précise que la différence de rendement entre une production

---

<sup>1</sup> William Baxter, « Electric Motors », *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1886-1887, p377.

centralisée et une production décentralisée n'est pas très prononcée, et c'est là son autre avantage :

« Cette augmentation du rendement avec les dimensions des machines mises en jeu est une loi pratique générale de l'énergétique qui déborde le cadre de la thermodynamique proprement dite ; un transformateur électrique industriel a en général un rendement supérieur à celui d'un transformateur de cinquante watts de puissance nominale. Toutefois, cette tendance est beaucoup moins marquée avec les nouvelles formes d'énergie, comme l'énergie électrique, qu'avec les anciennes, comme la chaleur. »<sup>1</sup>

Avec l'électricité, il est donc possible de revenir à une *production* et une *distribution* décentralisées de la force motrice, c'est-à-dire de rendre chaque utilisateur, particulier ou professionnel, autonome. Nous allons voir que ce projet n'est pas tout à fait nouveau.

## *b) Installations électriques autonomes*

### *1. Installations électriques autonomes avec moteurs à gaz*

Au début des années 1880, le *Journal des usines à gaz* avait conscience que le succès des centrales électriques n'était pas encore assuré. Il leur semblait donc plus approprié, pour une usine à gaz voulant se lancer sur le marché de la fourniture d'électricité pour des professionnels, de le faire sur un mode de production décentralisé, en installant un moteur à gaz sur le lieu de consommation, ce dernier alimentant la ou les dynamo(s) nécessaire(s). Dans ce cas, « les dépenses se trouvent réduites au strict nécessaire et restent proportionnées à la demande de la clientèle électrique, jusqu'ici plus rare qu'on ne le croit. On ne peut pas créer une station centrale pour un théâtre, pour quelques cafés, tandis qu'il est facile, avec le moteur à gaz, de contenter ces amateurs du progrès, sans cesser de les compter au nombre d'abonnés. »<sup>2</sup>

Lorsqu'il fallait produire de l'électricité chez soi, le particulier avait le choix entre les mêmes énergies primaires qu'un gestionnaire de centrale, à savoir la vapeur, l'eau ou le gaz. En 1886, la machine à vapeur domestique n'existait pas. La force hydraulique n'était pas disponible en ville et se trouvait loin des « agglomérations populeuses où l'on en a justement

---

<sup>1</sup> Gilbert Simondon (2012), *ibid.*, p184.

<sup>2</sup> *Journal des usines à gaz*, n°121, 5 septembre 1886, p274.

besoin »<sup>1</sup>. Ainsi, selon l'ingénieur électricien gallois William Preece (1834 – 1913), auteur d'une conférence sur l'éclairage électrique domestique à la *Société des arts de Londres*, le moteur à gaz était donc « le seul qui convienne à des maisons particulières. »

Contredisant l'argument souvent avancé selon lequel les utilisateurs, et plus particulièrement leurs domestiques puisque nous sommes au 19<sup>ème</sup> siècle, devaient être formés pour pouvoir utiliser leurs machines, William Preece pensait que « le fonctionnement de la machine à gaz n'est pas au-dessus de l'intelligence des domestiques ordinaires. »<sup>2</sup>

Werner Siemens, pionnier de l'électricité, possédait un château en Angleterre autonome en électricité, dans lequel il avait la place d'installer une machine à vapeur qui mettait en mouvement des dynamos. Le courant produit servait à éclairer une serre la nuit et à alimenter des moteurs de machines agricoles le jour :

« Le courant électrique est utilisé pendant toute la nuit pour produire deux foyers lumineux, sous l'influence desquels poussent divers fruits et plantes ; et, le jour, le courant d'une des machines met en mouvement une machine semblable, qui fait marcher le hache-paille et d'autres instruments à la ferme, éloignée d'environ un quart de mille des serres. De la même façon, le courant d'une autre machine actionne la pompe, située à environ un demi-mille. »<sup>3</sup>

L'installation était économe en énergie puisque la chaleur des machines à vapeur était récupérée pour chauffer les serres, et économe en personnel puisque le jardinier travaillait aussi à l'exploitation des machines à vapeur et électrique : « Avec ces arrangements, un seul homme peut faire à la ferme le travail de trois. »<sup>4</sup>

## 2. Eoliennes

Les forces naturelles telles que la force des marées ou celle du vent avaient également été envisagées et testées pour produire de l'électricité de manière décentralisée dès les débuts de

---

<sup>1</sup> « La lumière électrique chez soi. - Petites nouvelles », *Journal des usines à gaz*, n°112, 20 avril 1886, p136-137.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> Auguste Guérout, « Les chemins de fer électriques et la transmission de la force par l'électricité, par M. Alexandre Siemens », *La Lumière Electrique*, Volume 4, n°29, 9 juillet 1881, p42 à 45, p42-43.

<sup>4</sup> Ibid., p43.

l'industrie électrique. Jusqu'en 1911 au moins, les éoliennes n'étaient pas qualifiées d'éoliennes mais de moulins à vent électriques. Ils étaient alors le plus souvent utilisés pour alimenter en électricité des petites usines, châteaux, villas ou installations agricoles. Seules des installations de faible puissance (2 à 10 chevaux) étaient en service.

#### *a) Dépenses de premier établissement*

Aux Etats-Unis, en 1889, un ingénieur électricien, Charles Brush (1849 – 1929), installa dans le jardin de sa maison un moulin à vent relié à une dynamo de sa construction et à un accumulateur. En termes de frais de premier établissement, le moulin à vent coûtait plus cher qu'une machine à vapeur mais en ce qui concerne les frais d'exploitation les deux machines se valaient. L'auteur de l'article paru dans la revue *Scientific American* qui décrivait cette installation commentait le coût global de l'installation en ces termes :

« (...) Mais, dans le cas actuel, comme le dit notre confrère américain, on pouvait négliger la question du prix de revient, puisqu'on avait la grande satisfaction d'asservir un des agents les plus capricieux de la nature. »<sup>1</sup>

#### *b) Problème du stockage*

En Europe, le professeur La Cour installa des éoliennes au Danemark, en Suède et en Norvège, contrées à la météo favorable. Des moteurs à pétrole (benzol) de secours furent installés pour compenser l'absence de vent et charger les accumulateurs. En effet le problème avec les éoliennes était qu'il fallait pouvoir stocker l'énergie électrique produite, de manière à pouvoir l'utiliser quand le besoin était là, et pas uniquement quand le vent soufflait. La conception des moulins électriques dépendait des connaissances météorologiques et des vents sur lesquels ils devaient être installés. Un article de la revue *La Nature* datant de 1891 souligne également l'intérêt de la gratuité du vent, tout en rappelant l'inconvénient de son irrégularité :

« Les projets qui ont été proposés depuis plusieurs années pour utiliser la puissance motrice du vent sont très nombreux. Ils ont été souvent mis à exécution, et on cite plusieurs installations qui ont

---

<sup>1</sup> Joseph Laffargue, « Utilisation de la force du vent. Le moulin électrique de Cleveland (Etats-Unis), *La Nature*, 1891, 1er semestre, p98.

fonctionné avec des moteurs à vent. Le procédé est assurément efficace quand il s'agit d'applications locales dans les pays où le vent souffle avec force et d'une façon presque continue ; il cesse d'être pratique quand il faut utiliser à distance la puissance produite. Avec les moteurs à vent, en effet, la transformation de l'énergie exige l'emploi d'accumulateurs électriques s'il s'agit d'une application différée. Les accumulateurs une fois chargés doivent être transportés à distance. Personne n'ignore toutes les difficultés que présente ce mode de transport, surtout dans les montagnes ou sur les bords de la mer. »<sup>1</sup>

Un inventeur canadien Reginald Fessenden (1866 – 1922), spécialiste des communications sans fil, imaginait déjà en 1911 la création de centrales électriques fonctionnant avec des éoliennes :

« Il est fort tentant d'utiliser la force motrice du vent. L'air en effet, jusqu'à nouvel ordre, échappe à toute taxe et cède son énergie cinétique aux moulins à vent sans grand frais d'installation, d'entretien, ni de surveillance. Enfin, le vent contient des réserves d'énergie réellement gigantesques, et que, chose curieuse, l'on utilise de moins en moins.

C'est qu'il échappe aussi à toute loi régulière et ne travaille que par intermittence. Depuis longtemps déjà les ingénieurs agronomes lui font remplir, par l'intermédiaire de pompes, des réservoirs pour l'irrigation. Les ingénieurs électriciens s'occupent de lui faire charger des accumulateurs pour l'éclairage et la force motrice. Si l'on réussit quelque jour, par l'un ou l'autre de ces artifices, à capter à bon compte l'énergie aérienne, un grand problème sera résolu qui mettra à la disposition de l'humanité une source nouvelle de force motrice, comparable à la houille blanche. »<sup>2</sup>

La charge des accumulateurs était essentielle à la rentabilité des éoliennes. Le défi principal à relever était que les moulins à vent électriques devaient pouvoir fournir une tension constante de manière à optimiser la charge des accumulateurs. Pour la régulation du courant, on utilisait alors des régulateurs Thury, constitués d'un petit moteur électrique qui retirait ou ajoutait des éléments dans le circuit afin d'éviter les sur- ou sous-tensions respectivement.

---

<sup>1</sup> Ibid., p97-98.

<sup>2</sup> R. Debré, « L'utilisation électrique du vent », *La Nature*, 1911, 2ème semestre, p11.

### *3. Les origines de l'autonomie énergétique*

On le voit, l'idée de produire de l'énergie de manière décentralisée remonte à loin. Dans le domaine de l'éclairage au gaz, le français Philippe Lebon (1767 – 1804) inventa une thermolampe à gaz, indépendante du réseau, qui permettait de s'éclairer et de se chauffer au gaz dans une maison. Le britannique William Murdoch (1754 – 1809) reprit son système lorsqu'il tenta dans un premier temps de créer des récipients transportables de gaz. Puis finalement, il préféra créer une liaison fermée entre le lieu de production, l'usine à gaz, et le lieu de consommation du gaz. Pour Wolfgang Schivelbusch, « l'industrialisation de l'éclairage commença donc avec la lumière à gaz. Le brûleur de gaz qui remplaça la lampe à huile et la bougie n'était plus une lampe, au sens strict, mais la bouture d'une usine à gaz. »<sup>1</sup> Ainsi la thermolampe grandit jusqu'à avoir la taille d'une usine à gaz. Ceci équivalait à une mise sous tutelle de la maison au producteur d'énergie industriel<sup>2</sup>, et à la fin de l'autarcie de la maison. Pourtant la maison aurait pu être autonome pour son éclairage et son chauffage grâce à la thermolampe. Le choix de connecter la maison au réseau fut rapidement fait et la maison passa du statut autonome au statut dépendant. La production centralisée d'une grande entreprise devenait maintenant garante de l'épanouissement individuel, en d'installant une lampe électrique dans chaque foyer. Pour Wolfgang Schivelbusch, « les craintes d'explosion et de pollution traduisent le malaise d'être en liaison directe avec une industrie aussi dangereuse. »<sup>3</sup> En France, au moment où les gestionnaires de centrales électriques et d'usines à gaz se positionnaient sur le marché de l'éclairage, la lampe à pétrole, commercialisée vers 1860 et déconnectée des deux réseaux, était encore couramment utilisée, de même que la bougie.

---

<sup>1</sup> Wolfgang Schivelbusch (1993), *ibid.*, p32.

<sup>2</sup> *Ibid.*

<sup>3</sup> *Ibid.*

*c) Les moteurs indépendants du réseau de câbles électriques. Matérialité du réseau transcendue. L'organisation du territoire en question*

1. L'autonomie dans les transports

a) La notion de seuil

En régime industriel, selon Ivan Illich, il faut gagner du temps, rétrécir l'espace, accroître l'énergie, multiplier les biens, ignorer les normes naturelles, prolonger la durée de vie et remplacer les organismes vivants par des mécanismes qui les simulent ou amplifient une fonction particulière. Pour faire tout ça, l'esclave a été remplacé par l'outil. Ivan Illich le définit comme tout instrument raisonné de l'homme, tout objet pris comme moyen pour une fin. Il définit l'outil juste, ou « convivial », selon trois critères : survie, équité, autonomie créatrice<sup>1</sup>. Il doit être générateur d'efficacité sans dégrader l'autonomie personnelle, il ne doit susciter ni esclaves ni maîtres, et il doit élargir le rayon d'action personnelle.

Il donne l'échelle de répartition des outils suivante :



Le transport de gros tonnages était selon Ivan Illich typiquement industriel et non convivial. Il considérait que les réseaux d'autoroutes, les systèmes de communication à grande distance qui utilisent une large bande de fréquence, l'exploitation minière à ciel ouvert et l'école obligatoire étaient des outils toujours destructeurs de convivialité car ils augmentent l'uniformisation, la dépendance, l'exploitation et l'impuissance.

<sup>1</sup> Ivan Illich (1973), *La convivialité*, Editions du Seuil, p31.

Pour maintenir la convivialité du transport, il faisait appel à la notion de seuil. Nous avons déjà fait appel à cette notion lorsqu'il y avait un arbitrage à faire dans le choix du type de courant, continu ou alternatif, pour les alimenter les moteurs de traction. Au-delà d'une certaine distance seuil entre la centrale et le tramway, il était plus rentable de produire l'énergie électrique sous forme de courant alternatif, et de le convertir en courant continu dans des sous-stations proches des moteurs de tramways.

Pour Ivan Illich, il ne fallait pas dépasser un certain seuil d'énergie transportée, sous peine de quoi les outils pour y parvenir devenaient nocifs. Sa jauge : l'énergie métabolique. L'être humain dispose en effet de deux types d'énergie : l'énergie métabolique, qui vient de lui, et l'énergie en général, qui vient de l'extérieur. De ces deux types d'énergie à sa disposition, découlent deux types d'outil : l'outil maniable, qui fonctionne avec de l'énergie métabolique, et l'outil manipulable, qui fonctionne avec de l'énergie extérieure.

Dans tout transport, l'être humain doit toujours être capable d'avoir recours à sa propre énergie. Si ce n'est pas le cas, alors c'est que l'on bascule dans le régime industriel. Appliquée au domaine du transport de personnes ou de marchandises, la solution proposée est de ne pas dépasser une certaine vitesse, égale au rapport « distance/temps », c'est-à-dire que distance et temps doivent se suivre. Ce qui signifie que l'électricité ne peut servir à aucun transport, car avec elle distance et temps ne se suivent plus, nous sommes dans l'instantanéité des distances franchies. L'électricité serait donc venue retarder les possibilités de mise en place d'un monde convivial. Avec elle, distance et temps ne constituent plus des limites, les seuils peuvent être franchis. Ce qui se retrouve dans l'affirmation de Gilbert Simondon selon laquelle les réseaux électriques et les réseaux routiers sont frères (leur parent commun étant la concentration industrielle thermodynamique) :

« La décentralisation industrielle autorisée par le transport de l'énergie électrique à grande distance a besoin, comme corrélatif, de l'automobile comme moyen de transport des personnes en des lieux éloignés les uns des autres et à des altitudes différentes ; ce qui correspond à la route et non au rail. L'automobile et la ligne à haute tension sont des structures techniques parallèles, synchronisées, mais

non identiques : l'énergie électrique ne se laisse pas, actuellement, appliquer à la traction automobile. »<sup>1</sup>

La voiture, comme l'énergie électrique, avaient vocation à effacer distance et temps de transport. Aujourd'hui, l'une est sur le point de servir de carburant à l'autre.

#### *b) La question du stockage de l'électricité dans les transports*

Depuis les débuts de l'industrie électrique, les ingénieurs électriciens ont mené des recherches permettant de rendre les déplacements au moyen de moteurs électriques possibles et indépendants du réseau, grâce aux batteries d'accumulateurs.

#### *1. Trains autonomes*

##### *a) Trains et tramways avec accumulateurs*

À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, quasiment tous les tramways électriques fonctionnaient avec des fils aériens. Il y avait cependant une autre technique permettant d'amener le courant au moteur électrique du tramway, la traction avec accumulateurs, qui consistait à installer une batterie sur le wagon équivalent au tender des trains à vapeur, dans lequel se trouvait le stock de charbon des trains à vapeur, et les tramways avec motorisation hybride constituée d'un groupe électrogène.

Le premier tramway à accumulateurs fut conçu par l'Écossais Davidson en 1840. L'électricité était fournie par une pile et le train roulait sur des rails à la vitesse de 6,5 km/h avec une puissance d'un demi-cheval<sup>2</sup>.

En France, en 1880, Marcel Deprez et Edouard Hospitalier partageaient l'avis que l'utilisation de moteurs électriques et de piles transportés dans les véhicules de tramway pour les faire avancer n'était pas du tout économique. Afin de démontrer que le problème du stockage de l'électricité n'était pas encore résolu et que les véhicules électriques autonomes

---

<sup>1</sup> Gilbert Simondon (2012), *ibid.*, p86.

<sup>2</sup> Henri de Graffigny (1907), *La locomotion électrique*, Paris: Librairie des publications populaires, p7.

ne pouvaient pas encore être utilisés économiquement, Edouard Hospitalier considéra une voiture de tramway pesant 4 tonnes avec voyageurs, batterie et moteur inclus, circulant soit sur une route plate, soit sur une route pentue<sup>1</sup>. Dans le premier cas, le coefficient de traction du véhicule était de 10 kg/tonne et sa vitesse 9km/h. Il en déduisit que sa puissance était de 1.5 chevaux. Dans le cas d'une route en pente de 1%, à la même vitesse, Edouard Hospitalier supposait que la puissance à fournir devait être double. Comme la plupart de ses collègues électriciens en 1880, Edouard Hospitalier faisait lui aussi appel à la loi de Jacobi, selon laquelle le rendement correspondant à la puissance maximale du moteur était de 50%. Le modèle de pile le plus répandu en 1880 était la pile Bunsen, construit par Heinrich Ruhmkorff. Pour obtenir une puissance de 6 chevaux, la pile devait peser 1,5 tonnes environ. Au-delà de ce calcul, Edouard Hospitalier n'envisageait pas que le rendement puisse atteindre les 50% théoriques car d'autres facteurs allaient nécessairement entrer en jeu : « En pratique, les frottements propres du moteur, des transmissions, les mauvais contacts, la polarisation des piles, les résistances des conducteurs, etc., augmenteraient ce chiffre dans de très grandes proportions (...). »<sup>2</sup> Ce qui portait selon lui le poids de la pile à 2,5 tonnes. Le poids total du véhicule ne pouvant pas dépasser 4 tonnes, restait donc 1,5 tonnes pour la masse des voyageurs, du moteur et de la carrosserie du véhicule, ce qui n'était pas assez. Au vu de l'état des connaissances en 1880 concernant le stockage de l'électricité, il fallait, selon Edouard Hospitalier, renoncer aux véhicules électriques autonomes :

« Si (...) il s'agit d'employer l'électricité à la traction des tramways ou des voitures particulières en transportant avec soi le générateur électrique, l'idée devient manifestement irréalisable (...). »<sup>3</sup>

A ce moment-là, Edouard Hospitalier croyait si peu à la voiture électrique qu'il écrivait, à la suite de l'extrait ci-dessus :

« Que faut-il penser (...) de cette annonce cueillie dans un journal politique quotidien :

« L'infatigable Edison vient de télégraphier à un de ses amis de Paris qu'il avait trouvé le moyen de faire marcher des voitures particulières à l'aide de l'électricité, et cela à très bon marché. Il a construit une petite voiture, ayant la forme d'un traîneau à roulettes, pour son usage particulier. Cette voiture

---

<sup>1</sup> Edouard Hospitalier, « L'électricité et la locomotion », *La Lumière Electrique*, volume 2, n°24, 15 décembre 1880, p501-502, p501.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> Ibid.

fonctionne en ce moment dans les rues de New York. La nuit, elle laisse derrière elle un sillon lumineux qui éclaire d'une vive lueur tous les objets environnants. »

Il y a gros à parier pour que ce soit là un de ces canards immenses dont l'Amérique a le secret ; mais dans le cas fort improbable où le fait serait vrai, on peut être sûr qu'aucun des systèmes de piles actuellement connus ne permet, sans une découverte nouvelle, la réalisation pratique de cette idée, et certainement Edison n'aurait pas fait cette découverte sans la crier sur les toits.

Peut-être de grands perfectionnements dans les accumulateurs électriques, c'est-à-dire les piles secondaires, permettront-ils un jour de mettre à exécution cette idée si souvent cherchée sans résultat, mais rien, dans l'état actuel de nos connaissances, ne peut encore faire entrevoir le jour prochain où l'on pourra considérer comme autre chose qu'un mot jeter en l'air ce titre séduisant d'un article d'un journal américain :

*A chacun sa locomotive !* »<sup>1</sup>

Aux Etats-Unis, en 1890, les rares tramways électriques à accumulateurs étaient installés dans les très grandes villes américaines. En 1890, pour Frank Sprague aussi, « the storage battery is still a long way from being a serious competitor of the direct source of supply »<sup>2</sup>. Le problème était son poids, l'espace qu'elle occupait dans le véhicule, son entretien et les arrêts fréquents qu'elle nécessitait.

Avec des tramways reliés directement au réseau, grâce aux transmissions par rail ou par fil, il était possible de maintenir le service de 5 ou 6h du matin jusqu'à minuit, et les voitures pouvaient parcourir 150miles par jour, soit 250km environ. La moitié seulement de cette distance pouvait être atteinte avec des tramways à accumulateurs. L'autre limite atteinte avec l'usage des batteries sur tramways étaient la pente de la voie, qui ne pouvait dépasser 4%<sup>3</sup>.

En 1897, un certain Auvert de la compagnie Paris-Lyon-Méditerranée réalisa une étude sur une locomotive électrique à accumulateurs. Elle était alimentée en électricité avec une

---

<sup>1</sup> Ibid., p502.

<sup>2</sup> Frank J. Sprague, « Application of Electricity to Street Railways », *Proceedings of the National Electric Light Association*, Février 1890, p200.

<sup>3</sup> Ibid.

batterie portée par la locomotive et son tender, qui alimentait en électricité plusieurs moteurs. La locomotive roulait à 100km/h.

En 1912, la *Compagnie générale des omnibus de Paris* remplaça deux lignes de tramways à fil aérien, « Vincennes – Louvre » et « Cours de Vincennes – Louvre », par des tramways avec accumulateurs, présentés lors de l'Exposition universelle à Paris en 1900. Construit par la *Compagnie Fives-Lille*, chaque tramway était à une voiture équipée de deux moteurs à quatre pôles placés entre les essieux, alimentés en électricité par une batterie pesant 4,7 tonnes.

*b) Trains hybrides. 1894 – 1896. « La Fusée », locomotive de Jean-Jacques Heilmann*

Dans les tramways avec groupe électrogène, un moteur thermique alimentait une dynamo reliée à un moteur électrique qui mettait en mouvement le train. Le train, autonome également, était en quelque sorte doté d'une petite centrale électrique mobile, installée sur la locomotive ou sur le tender. Cette avancée technologique en matière de puissance était justifiée par l'augmentation régulière du tonnage des trains et des exigences des passagers en termes de vitesse<sup>1</sup>.

En France, en 1894, une locomotive hybride, surnommée « La Fusée », construite selon les principes de Jean-Jacques Heilmann, fut mise à l'essai par la *Compagnie des chemins de fer de l'Ouest*.

La motorisation de « La Fusée » en 1894 était composée d'une chaudière et d'une machine à vapeur de 600 chevaux, dont les dimensions étaient telles que le mécanicien et le chauffeur ne pouvait pas communiquer entre eux. Plusieurs expériences furent réalisées avec cette locomotive. La première eut lieu entre Beuzeville et le Havre, sur la ligne Paris – Le Havre. La locomotive électrique allait alors aussi vite qu'une locomotive à vapeur. D'autres essais eurent lieu par la suite entre Paris et Mantes, où la locomotive atteignit la vitesse maximum de 105 km/h. La locomotive put également remorquer « quelques trains express du service

---

<sup>1</sup> H. de Grièges, « Des progrès de la traction électrique dans les chemins de fer français », *Mémoires et compte-rendu de la Société des Ingénieurs Civils*, 1896, 1<sup>er</sup> semestre, Volume 65, p196 à 203, p196-197.

ordinaire »<sup>1</sup>. Ce dernier fait était important pour la *Compagnie des chemins de fer de l'Ouest* qui souhaitait rester dans l'histoire comme la première entreprise à faire circuler une locomotive électrique sur son réseau<sup>2</sup>.

Un nouveau modèle de « Fusée » fut conçu en 1896, avec une puissance double par rapport au modèle précédent. Les ingénieurs eurent l'idée de placer la machine à vapeur des locomotives sur des ressorts afin d'éviter les vibrations, comme c'était déjà le cas sur les bateaux. La locomotive put parcourir 2 000 km au total sans problème d'entretien. Les essais furent donc considérés comme un succès.

Le plus gros inconvénient de la Fusée était son poids, elle pesait 120 tonnes alors qu'une locomotive à vapeur avec son tender de la *Compagnie des Chemins de fer du Nord* pesait 81 tonnes.

### c) Trains routiers

Pour contrer le défaut des trains électriques autonomes, en plus des trains hybrides on tenta de développer un autre type de trains autonomes, avec moteurs à essence cette fois. Les trains routiers, équipés de moteurs à essence, avaient pour objectif le transport de marchandises, tel que le ravitaillement des troupes pendant la guerre et de remplacer les voitures à cheval qui autrefois occupaient cette fonction. Le colonel Charles Renard en développa quelques-uns aux alentours de 1900 et demanda à Maurice Lévy de présenter son invention devant l'Académie des Sciences en 1903. Il parvint à exporter son train jusque chez le shah de Perse<sup>3</sup>. L'avantage était que chaque voiture était reliée à un attelage de direction de manière à faire en sorte que chaque voiture puisse suivre le même tracé. Contrairement aux tramways sur voies ferrées, les trains routiers avaient l'avantage de ne pas avoir besoin d'un gros investissement en rapport avec la construction des rails<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> Ibid., p197.

<sup>3</sup> Revue Olympique, Mars 1906, p47.

<sup>4</sup> G. Espitallier, « Le train routier du colonel Renard », *La Nature*, 1904, p91-94.

## 2. Voitures

En ce qui concerne les voitures particulières, comme le note un rédacteur de la revue *La Nature* en 1904, les innovations techniques réalisées dessus ont eu d'emblée la particularité d'intéresser le plus grand nombre, contrairement à celles réalisées sur les véhicules de transport en commun par exemple :

« L'industrie automobile possède ce mérite d'être la seule industrie dont les moindres actes puissent intéresser les foules non seulement par les résultats pratiques dont chacun tire profit, mais par l'exhibition même des moyens qui permettent de les obtenir.

Une exposition de tramways ou de locomotives, de machines électriques, de canons, de machines à imprimer, une exposition minière, etc., bien qu'étant la manifestation d'industries puissantes dont l'importance peut être parfois primordiale pour toute une population ouvrière, n'attirerait que quelques rares visiteurs. Et pourtant tout le monde sans exception lit des journaux, va en chemin de fer, est soldat, se chauffe avec du charbon, etc. Au contraire, peu de gens peuvent faire de l'automobile ; dans les campagnes même, une animosité existe encore des gens de terre envers les voitures qui dévorent l'espace, et cependant des foules puissantes viennent s'écraser chaque année dans le Grand Palais où s'exhibent les produits divers de l'industrie automobile. Pourquoi ? Est-ce le goût sportif, est-ce l'influence attractive qu'ont toujours eu les objets de luxe ; est-ce encore autre chose d'indéfinissable ? Toujours est-il que seules les expositions universelles ont pu rassembler en un même point des affluences plus nombreuses que celles qui, pendant quinze jours, déroulent leurs remous dans les galeries et les nefs du Grand Palais, aujourd'hui trop petit et des Serres de la Ville de Paris qu'on y a adjointes. »<sup>1</sup>

Le succès populaire du Salon de l'auto, qui a lieu tous les ans depuis 1901, avec une interruption en 1909 et une autre entre 1939 et 1945, témoigne de cet intérêt pour les voitures individuelles.

Les motorisations testées pour obtenir des voitures indépendantes du réseau furent les mêmes que pour les véhicules collectifs. Comme pour les tramways précédemment évoqués, les batteries installées sur les voitures individuelles entre 1880 et 1914 présentaient de nombreux inconvénients : elles étaient trop lourdes, leur entretien trop cher et le dégagement

---

<sup>1</sup> Léo Robida, « Le salon de l'automobile. Septième exposition internationale de l'automobile, du cycle et des sports », *La Nature*, 1904, p70-71.

de vapeurs acides et corrosives gênaient les utilisateurs<sup>1</sup>. Avant 1895, bien qu'il y ait eu quelques expériences, il n'y a pas eu de voitures électriques en exploitation commerciale<sup>2</sup>. En 1883, Raffard et Gustave Trouvé réalisèrent des essais sur une voiture électrique à accumulateurs Faure. Cette voiture était très lourde. La *Compagnie générale des Omnibus de Paris* sponsorisa les essais, au terme desquels elle décida de ne pas commercialiser le véhicule<sup>3</sup>.

Entre 1895 et 1903, l'Automobile Club de France organisa un concours annuel de voitures. En 1894, une première course fut organisée entre Paris et Rouen. Cinq voitures électriques participèrent mais c'est une voiture à vapeur du constructeur de Dion qui remporta la course. En 1895, une course composée uniquement de voitures électriques fut organisée sur un parcours de 1200 km faisant l'aller-retour entre Paris et Bordeaux. Parmi elles, la voiture Jeantaud participa, équipée d'une batterie et d'un moteur à courant continu d'une puissance maximale de 10 chevaux. C'était la première voiture à pouvoir « faire un parcours convenable »<sup>4</sup>. Les autres constructeurs étaient Krieger, Rikkers, Garcin et le Belge Camille Jenatzy, constructeur de la « Jamais Contente », célèbre pour avoir été la première voiture, tout moteur confondu, à atteindre la vitesse de 100km/h en 1899. La construction de cette voiture fut financée par la maison Rothschild, dont l'ingénieur en charge était Léon Auscher.

En juin 1898, l'Automobile-Club de France organisa un concours de fiacres, ou taxis. Onze voitures électriques y participèrent, ainsi qu'une voiture à essence, construite par Peugeot. L'année suivante, la *Compagnie Générale des Voitures à Paris* mit en service dans la ville 110 taxis électriques du système britannique Bersey. Les batteries de véhicules étaient chargées dans une usine à Aubervilliers, équipée de 159 postes de charge. En 1905, l'ingénieur français L. Krieger, l'un des leaders de la construction de véhicules électriques en France, avait la vision rétrospective suivante sur le concours :

---

<sup>1</sup> Henri de Graffigny (1907), *La locomotion électrique*, Paris : Librairie des publications populaires, p13.

<sup>2</sup> Edouard Hospitalier (1902), *ibid.*, p11.

<sup>3</sup> Henri de Graffigny (1907), *ibid.*, p9.

<sup>4</sup> L. Krieger, « Les voitures électromobiles », *La Nature*, Volume 85, 1905, 2<sup>ème</sup> semestre, p446.

« L'éclosion de la voiture électrique date du concours de fiacres organisé par l'Automobile-Club en 1898 ; grâce aux perfectionnements apportés dans la construction des moteurs et des accumulateurs, certaines des voitures engagées parcoururent 100 km et plus. »<sup>1</sup>

Néanmoins, le concours de fiacres organisé en 1903 permit de constater que l'exploitation commerciale des véhicules électriques était un échec en France. En 1906, Krieger décida de vendre ses brevets à une entreprise allemande dont le projet était d'équiper en véhicules municipaux électriques plusieurs grandes villes allemandes, dont Berlin.

Le véhicule électrique disparut du marché français de la traction individuelle et collective pendant quelques années avant de revenir dans les années 1920, juste après la première guerre mondiale. En France, en 1924, il n'y avait en circulation que quelques dizaines de véhicules électriques à accumulateurs. Le marché le plus florissant était le marché états-unien, où environ 40 000 véhicules à accumulateurs circulaient. Ils étaient utilisés comme voitures de transport en commun (tramways, bus), camionnettes ou camions, voitures municipales pour l'arrosage et le nettoyage des rues, et l'enlèvement des ordures, fourgons de l'administration des postes.

### *Les voitures hybrides*

Les voitures hybrides étaient construites avec un moteur thermique qui actionnait une dynamo reliée à une batterie qu'elle rechargeait. La batterie fournissait son courant à la dynamo qui se transformait en moteur uniquement dans les côtes. Le reste du temps, c'est le moteur thermique qui faisait avancer la voiture. Le groupe électrogène fonctionnait à puissance constante, quelle que soit la puissance demandée à la voiture. La batterie avait pour rôle de réguler la puissance fournie par le groupe électrogène. De plus le moteur électrique pouvait aussi servir de frein, lorsqu'il était mis en court-circuit.

L'autre avantage d'avoir deux moteurs était que lorsqu'un était en panne, l'autre pouvait prendre le relais, à condition d'avoir une batterie chargée, ou un peu d'essence dans le réservoir. Lors du premier salon de l'auto en 1901, une voiture hybride construite par

---

<sup>1</sup> Ibid.

Jenatzy fut présentée. L'auteur de l'article dont nous tirons cette information écrivait en 1901 : « Il y a là une conception fort ingénieuse de la combinaison des moteurs à pétrole et électrique. Laissons à l'expérience le soin de décider de l'avenir d'une telle disposition. »<sup>1</sup>

Contrairement aux trains routiers qui n'ont finalement pas connu de succès commercial, inutile de préciser que les voitures à essence n'ont pas connu le même sort.

## *2. Retour de la contrainte de la matière. Recherches inabouties sur les aimants permanents*

Nous évoquons ici un type de moteurs déjà décrit en première partie, les moteurs à aimants permanents. L'histoire de l'utilisation industrielle du moteur à aimant permanent à partir de 1870 repose la question de l'influence des conditions de production et de transport de l'énergie électrique sur le choix du type moteur le plus utilisé.

L'inconvénient des électro-aimants était que pour obtenir leur aimantation, il fallait avoir recours à l'électricité. Avec les aimants permanents, une partie du courant de la ligne de distribution est ainsi économisé. On distingue ainsi les moteurs dynamo-électriques, uniquement composés d'électro-aimants, des moteurs magnéto-électriques, construits avec des aimants permanents et des électro-aimants et donc qui ont besoin de courant électrique pour fonctionner, des moteurs magnétiques, constitués uniquement d'aimants permanents.

Nous avons vu que l'invention des machines à électro-aimants signa la fin, temporaire, des machines magnéto-électriques, notamment celles de la compagnie l'Alliance. Pourtant, les recherches, celles de Demoget par exemple, montraient que le maximum de rendement n'avait pas été atteint avec les machines à aimants permanents.

Quant aux moteurs magnétiques, constitués uniquement d'aimants permanents, ils permettraient de se libérer complètement de la ligne de distribution pour produire du mouvement. Aujourd'hui, ils sont qualifiés de moteurs à énergie libre. Bien que des brevets aient été déposés, ils ne font pas encore l'unanimité au sein de la communauté scientifique et

---

<sup>1</sup> Revue *La Nature*, 1901, 1<sup>er</sup> semestre, p184, p186 et p245, p246.

industrielle et relèvent encore de la magie et non de la science. A propos de la magie, nous pensons comme Lewis Mumford qu'il faut en reconnaître l'audace. Ce dernier écrivait : « Tout comme les jeux de l'enfant ne font qu'anticiper sur la vie de l'adulte, la magie a anticipé sur la science et la technologie modernes. »<sup>1</sup>

En 1889, les machines à aimant permanent n'étaient plus utilisées que pour la production de petite quantité d'énergie. Elles alimentaient les débrayeurs, des mécanismes utilisés sur les métiers à tisser : « Toutes les fois que l'ensemble des métiers ne dépasse pas 25, il est économique d'employer la machine magnéto-électrique ; au-delà de ce nombre, le coût un peu plus élevé d'une dynamo ne constitue pas un obstacle sérieux. »<sup>2</sup>

Elles étaient également utilisées pour actionner les sonneries d'appel des installations téléphoniques, l'inflammation du mélange gazeux des moteurs à gaz et à pétrole, et pour provoquer l'explosion des amorces de mines<sup>3</sup>.

Pourtant aujourd'hui, les moteurs à aimant permanent sont redevenus à la mode. Sur le marché des moteurs à aimants permanents pour traction ferroviaire, Alstom est aujourd'hui le leader français. Dans le débat Latour / Lemonnier sur la contrainte de la matière, le moteur à aimant permanent serait donc l'avion canard dont parle Lemonnier. Sur le temps long, la matière a eu raison, le moteur à aimant permanent serait bien celui qui est le plus économique. Pourquoi a-t-il temporairement périclité ?

Nous avons vu que les machines à aimants permanents furent assez vite abandonnées au profit des machines à électro-aimants. Dans un article de la revue *La Nature* paru en 1873 sur les machines Gramme, Alfred Niaudet résuma en termes simples la question des machines à aimants permanents et à électro-aimants. Pour lui, l'avantage était aux aimants permanents : « Y a-t-il réellement avantage à substituer des électro-aimants aux aimants ? Il nous semble que poser cette question, c'est la résoudre. Supposons, en effet, que nous ayons à notre disposition un aimant d'une énergie magnétique égale à celle de l'électro-aimant qui le remplacerait, l'avantage du premier

---

<sup>1</sup> Lewis Mumford (1934), *ibid.*, p46.

<sup>2</sup> Gustave Richard, « Quelques applications mécaniques de l'électricité », *La Lumière Electrique*, Volume 34, n°44, 2 novembre 1889, p213 à 222, p221.

<sup>3</sup> Jules-Armand Montpellier (1902), *L'électricité à l'Exposition de 1900. 3e fascicule. Générateurs d'énergie électrique*, Paris : Dunod.

sur le second est frappant ; car l'électro-aimant n'a de vertu magnétique qu'autant qu'on l'excite au moyen d'un courant électrique, c'est-à-dire d'une dépense de force ; tandis que l'aimant garde invariablement le magnétisme qu'il a une fois reçu. Ainsi, au point de vue de la production économique de l'électricité, on voit qu'une machine à aimant dépense beaucoup moins qu'une machine à électro-aimant. D'ailleurs un électro-aimant est fabriqué avec du fer très-doux et du cuivre rouge en fils recouverts de coton et soigneusement isolés ; son prix ne peut donc être aussi économique que celui d'un aimant construit par la méthode Jamin.

En résumé donc, une machine magnéto-électrique à aimant coûte moins à établir qu'une machine à électro-aimant, et la production de l'électricité avec la première coûte moins qu'avec la seconde. On pourrait encore indiquer des avantages accessoires, par exemple, celui-ci : le magnétisme de l'aimant est constant, tandis que celui de l'électro-aimant est variable avec la vitesse de la machine ; cette permanence du magnétisme donne au moins une plus grande facilité à certaines expériences. »<sup>1</sup>

Alfred Niaudet citait les travaux de Jamin sur la production artificielle d'aimants permanents. Dans les années 1870, ce dernier était le scientifique de référence dans ce domaine<sup>2</sup>. Il présenta une étude en 1873 devant l'Académie des Sciences, dans laquelle il étudiait la distribution de la force magnétique dans un aimant, à un moment où les connaissances sur le sujet étaient encore insuffisantes<sup>3</sup>. Il est l'inventeur d'un appareil de mesure du magnétisme des aimants et d'une technique de production d'aimants à partir de lames d'acier, aimants qui étaient alors connus sous le nom d'*aimants artificiels feuilletés de Jamin*. Il en fit la présentation en 1873 devant la *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*. Son point de départ était que l'aimantation artificielle d'un barreau d'acier n'était effective qu'en surface. Dans les couches plus centrales, une aimantation de sens contraire était générée, ce qui nuisait à l'efficacité de l'aimantation. Il trouva donc que des lames d'acier artificiellement aimantées et empilées les unes sur les autres produisaient un barreau plus magnétique. Certains de ces aimants portaient jusqu'à 25 fois leur poids, d'autres pouvaient porter entre 250 et 350kg. Les aimants artificiels de Jamin étaient utilisés dans la

---

<sup>1</sup> Niaudet Bréguet, « Machine magnéto-électrique de Gramme », *La Nature*, 1873, p341 à 365, p344.

<sup>2</sup> Au siècle précédent, Charles-Augustin Coulomb présenta un mémoire en 1791 sur le même thème, intitulé « La distribution du magnétisme dans les aimants ».

<sup>3</sup> On peut retrouver cette étude dans deux articles insérés dans le bulletin de la *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, année 1874, Série 3, Tome 1, « Sur la théorie de l'aimant normal et sur le moyen d'augmenter indéfiniment la force des aimants, par M. J. Jamin », p45-50, et « Sur la conductibilité des tensions magnétiques, par M. Jamin », p456-461.

construction des machines magnéto-électriques. Pour Alfred Niaudet, ils coûtaient moins chers que des électro-aimants, dans lesquels il fallait compter le prix de l'électricité en plus du prix des matières premières.

Malgré tous ces avantages, ce sont les machines dynamo-électriques qui se développèrent le plus. Louis Figuier nous explique pourquoi :

« On a reconnu que, si au lieu d'aimants permanents, dans la *machine magnéto-électrique* que nous venons de décrire, on se sert d'aimants artificiels, d'aimants temporaires, en d'autres termes d'*électro-aimants*, selon le terme consacré, on produit, avec la machine ainsi modifiée, des courants électriques d'une puissance infiniment supérieure. Au lieu d'un aimant permanent, prenez un simple cylindre de fer très pur, et faites circuler autour de ce cylindre de fer un courant électrique : lorsque vous ferez tourner la bobine de fils conducteurs autour de cet *électro-aimant*, vous développerez 50 ou 60 fois plus d'électricité que si vous opérerez avec un aimant permanent. »<sup>1</sup>

Ainsi, les courants électriques engendrés par les machines dynamo-électriques étaient de plus grande intensité que ceux engendrés dans les machines magnéto-électriques, ce qui les rendait plus puissantes. Les machines à aimants permanents ont donc été assez vite remplacées par les machines dynamo-électriques, dans lesquelles les aimants permanents ont été remplacés par des électro-aimants.

Alfred Niaudet n'était pourtant pas le seul de l'avis que les machines à aimants permanents étaient les plus économiques sur le long terme. Malgré leurs inconvénients, en 1879, l'ingénieur Demoget pensait que la construction de telles machines, réversibles, n'avait jamais été suffisamment optimisée de manière à ce que leur rendement soit maximum. Il pensait même que leur rendement devait être supérieur à celui des machines à électro-aimants :

« Depuis que M. Gramme a inventé sa machine dynamo-électrique, les machines magnéto-électriques semblent délaissées par les inventeurs, bien que, théoriquement, le rendement de ces appareils dut être supérieur. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Louis Figuier (1884), *ibid.*, p195.

<sup>2</sup> E. Demoget, « Machine magnéto-électrique de M. Demoget », *La Lumière Electrique*, Volume 1, n°4, 15 juillet 1879, p75 à 78, p75.

Les machines à aimants permanents étaient considérées comme trop encombrantes et trop lourdes, mais Demoget pensait que cet inconvénient pouvait facilement être surmonté par le fait que leur rendement pouvait être meilleur<sup>1</sup>. Il réalisa des expériences qu'il qualifiait lui-même de théoriques en 1870, 1871 et 1872. En 1872, il construisit une machine magnéto-électrique dont les résultats étaient, selon son inventeur, remarquables. Sa machine pouvait fournir des courants continus ou alternatifs selon qu'elle était construite avec un collecteur ou un commutateur. Il en donna une description dans une note sous pli cacheté adressée à l'*Académie des Sciences* dans sa séance du 20 janvier 1873. Il arrêta ensuite ses recherches sur les machines magnéto-électriques à cause du succès des machines dynamo-électriques.

A l'Exposition internationale d'électricité à Paris en 1881, il y avait deux modèles de machines magnéto-électriques présentés, celle de l'Alliance et celle de Méritens, qui servaient toutes les deux à éclairer les phares. Dans un article de *La Lumière Electrique* en 1882, C.-C. Soulages nous apprend que les machines de Méritens étaient utilisées dans des phares en Angleterre, qui semblaient être le lieu d'utilisation propice à ce type de machines :

« Une expérience importante avait été faite dès le 5 avril 1880, à South Foreland, en face de Calais, et pendant près de six mois on n'a jamais constaté une seule extinction ; aussi ces appareils sont-ils de plus en plus recherchés pour l'éclairage des phares et pour la marine. »<sup>2</sup>

Cette même année, elles étaient également installées dans les phares de Marquerie, Planier, dans des phares appartenant au gouvernement russe et situés dans la mer d'Azoff et la Baltique. En 1884, Félix Benjamin Lucas, ingénieur en chef du service central des phares, réalisa des expériences sur les machines de Méritens<sup>3</sup>. Une autre mise en application des machines de Méritens fut faite en Angleterre, plus précisément à Combe-Bank, chez un certain Mr. Spottiswoode.

La machine de Méritens pouvait soit produire des courants alternatifs, soit des courants continus. Le système inducteur, d'où venait le champ magnétique, de la machine de Méritens était composé de cinq roues parallèles d'aimants permanents. Sur chaque roue, il y

---

<sup>1</sup> Ibid., p78.

<sup>2</sup> C. – C. Soulages, « Exposition Internationale d'Electricité : Galerie des machines : Alliance, Wilde, de Méritens », *La Lumière Electrique*, Volume 6, n°1-25, 1882, p515 à 518.

<sup>3</sup> Félix Benjamin Lucas, « Mémoire sur les Machines magnéto-électriques et l'arc voltaïque des phares », *Annales des Ponts et Chaussées*, 1885.

avait 8 aimants permanents en forme de fer à cheval, supportés par un bâti en bois près des aimants et sinon en métal, et donc 16 pôles magnétiques Nord et Sud. Le système induit, d'où sortait le courant, était composé de cinq roues en bronze, chaque roue étant constituée de 8 électro-aimants, activés par une machine excitatrice placée sur le même arbre que la machine principale. Il n'y avait qu'un seul mouvement pour mettre en marche, la machine de Méritens était auto-excitatrice<sup>1</sup>. Chaque pôle magnétique devait se faire face, s'attirer, se repousser puis passer au suivant, le tout sans se toucher. Un aimant correspondait à 20kg d'acier recouvert d'une couche fine de fer doux.

Edouard Hospitalier expliquait la faible représentation des machines à aimant permanent à l'Exposition Internationale d'Electricité en 1881 ainsi :

« Sans vouloir condamner les machines magnéto-électriques, il paraît établi, par l'Exposition même, que leur règne industriel est terminé. Il n'en faut pas conclure que les machines magnéto-électriques soient mauvaises, mais seulement qu'elles ne sont pas industrielles, au sens pratique du mot, c'est-à-dire qu'à puissance égale elles sont plus lourdes, plus chères et plus encombrantes que les machines dynamo-électriques, dont l'emploi est aujourd'hui presque universel. »<sup>2</sup>

Les machines magnéto-électriques étaient plus régulières que les dynamos. Plus chères également, mais la dépense de premier établissement était moins sensible dans les phares qu'ailleurs apparemment. C'est en tout cas l'argument avancé par Edouard Hospitalier<sup>3</sup>.

En 1885, la *Compagnie parisienne de l'éclairage électrique*, qui racheta quelques années auparavant la *Compagnie l'Alliance*, poursuivait ses recherches sur les machines à aimants permanents. J. Morin, qui travaillait pour cette entreprise, faisait le point sur ses travaux dans *La Lumière Electrique* :

« Appelé par la confiance des Administrateurs de la Compagnie parisienne d'éclairage par l'électricité (ancienne Compagnie l' « Alliance ») à examiner cette question, j'ai pu me convaincre, en effet, qu'après un long fonctionnement, la distribution de la chaleur dans la machine n'est pas uniforme et qu'elle peut fournir de précieuses indications. Ce fait m'a guidé dans mes recherches, et je me suis

---

<sup>1</sup> Edouard Hospitalier, « Nouvelle machine dynamo-électrique de M. de Méritens », *La Lumière Electrique*, Volume 2, n°7, 1er avril 1880, p135.

<sup>2</sup> Edouard Hospitalier, « L'éclairage électrique à l'Exposition d'Electricité. I. Les générateurs. II. Les foyers. L'éclairage par incandescence », *La Nature*, 1881, 2<sup>ème</sup> semestre, p279.

<sup>3</sup> Ibid.

attaché à réduire les dimensions du système induit qui était certainement trop volumineux pour le système inducteur. »<sup>1</sup>

Il termine ainsi :

« (...) L'utilisation des aimants laisse encore trop à désirer ; des perfectionnements importants sur ce point particulier, sont indispensables pour mettre les machines magnéto-électriques en état de lutter, dans une certaine mesure, avec les machines dynamo-électriques beaucoup plus économiques de construction. Je m'occupe actuellement de ce sujet. »<sup>2</sup>

Quand la machine électrique était en fonctionnement moteur, les aimants permanents avaient le défaut de perdre leur magnétisme à la longue, notamment sous l'action du courant électrique de la ligne de distribution. À la toute fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les aimants permanents étaient surtout utilisés dans les appareils de mesure. En 1895, 1896, 1897, 1898 et 1899, la *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale* organisa un concours pour la construction d'aimants permanents, accompagné de l'argumentaire suivant :

« Les aimants permanents, en fournissant des champs magnétiques indépendants, gratuits et relativement puissants, sont susceptibles de rendre de grands services dans le domaine des applications électriques ; ils se prêtent notamment d'une manière fort avantageuse à la construction de toute une catégorie d'instruments de mesure, et concourent ainsi efficacement à la solution des problèmes généraux. »<sup>3</sup>

Ce concours était récompensé d'un prix de 3000 francs.

A la fin de sa carrière, en 1927, l'ingénieur électricien Romuald-Victor Picou rédigea un ouvrage sur les aimants intitulé *Les aimants, leur calcul et la technique de leurs applications*, dont on trouve une brève description dans le bulletin de la *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale* :

« M. Picou, à qui ses travaux antérieurs ont valu une réputation méritée parmi les ingénieurs-électriciens, donne dans cet ouvrage le résultat de ses études sur un sujet resté jusqu'ici assez obscur. Les applications des aimants sont encore, en effet, restées le plus souvent empiriques ; condition

---

<sup>1</sup> J. Morin, « Sur un perfectionnement des machines magnéto-électriques de l'Alliance », *La Lumière Electrique*, 1885, n°43, 24 octobre 1885, Volume 18, p175.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1897, 96<sup>ème</sup> année, 5<sup>ème</sup> série, Tome 2, p567.

anormale qui s'explique par ce fait que la théorie physique du magnétisme ne paraissait pas pouvoir aisément se réduire aux conceptions des ingénieurs et à leurs méthodes de calcul. »<sup>1</sup>

Nous retrouvons ici le problème de la mesure chez les ingénieurs, évoqués par François Vatin dans son article « Esprit ingénieur et pensée calculatoire ». La mesure du magnétisme étant difficile, on laissa de côté les aimants et on se concentra sur ce que l'on pouvait plus facilement mesurer, les électro-aimants.

Il nota également qu'« Amartya Sen a distingué deux sources intellectuelles de l'économie : une tradition éthique, qu'il fait remonter à Aristote, et une tradition mécanique, qu'il associe à la pensée d'ingénieur. »<sup>2</sup> Selon lui, cette distinction n'est pas valable tout simplement parce que l'ingénieur, à sa manière, raisonne de manière économique, comme nous l'avons vu évoqué avec les calculs économiques des ingénieurs des Ponts et Chaussées. François Vatin écrit :

« Il faut donc remonter à la source du calcul d'ingénieur et reprendre les débats dans leur épaisseur historique pour repérer où les choix fondateurs ont été faits, choix souvent masqués, ensuite, par la sophistication du calcul, qui ne prend la figure de l'objectivité que quand ses bases ne sont plus discutées, quand l'inertie d'un travail intellectuel répétitif, l'automatisme de l'algorithme leur ont donné un caractère d'évidence. Cela jusqu'à ce qu'un retournement paradigmatique (au sens de Thomas S. Kuhn) intervienne, et que l'on reprenne la discussion à la base. »<sup>3</sup>

Comme dans l'exemple de Max Weber sur le fer et le platine, l'aimant permanent est-il une preuve de plus à l'argument selon lequel la conception d'un objet technique se fait aussi dans un souci d'économie ? En prenant en compte la rareté des aimants permanents, et en choisissant les électro-aimants à leur place, puis en adaptant la production d'électricité à ce choix (pour que le fer devienne électro-aimant, il est nécessaire de l'entourer d'énergie électrique), nous avons ici une illustration de la jonction entre les deux idéaux-type « économie pure » et « technique pure ».

Les ingénieurs électriciens étaient dans la technique pure lorsqu'ils cherchaient à réduire la quantité de travail nécessaire pour produire un mouvement à partir d'énergie électrique.

---

<sup>1</sup> Romuald-Victor Picou (1927), *Les aimants, leur calcul et la technique de leurs applications*, Paris : Dunod.

<sup>2</sup> Alexandra Bidet et François Vatin, « Pratique d'ingénieur et mesure de la valeur : le cas de la téléphonie », Réseau Canopé, *Idées économiques et sociales*, 2008/2, n°152, p6-16, p9.

<sup>3</sup> Ibid.

Lorsqu'ils prenaient en compte la rareté de l'aimant permanent et le remplaçaient par un électro-aimant, ils étaient dans l'économie pure. En même temps qu'ils réduisaient la quantité de travail nécessaire pour produire de l'électricité, ils prenaient en compte le fait que les aimants permanents étaient trop rares pour être utilisés industriellement<sup>1</sup>.

### 3. Moteurs à haute fréquence

#### a) Objectif des recherches de Nikola Tesla : se débarrasser des lignes de distribution

Lorsque l'on souhaite produire de la lumière ou de la force motrice, que la méthode soit électrique, chimique ou autre, il y a déperdition d'énergie sous forme de chaleur. Le principal objectif de Nikola Tesla, comme de tous les ingénieurs électriciens mentionnés jusqu'ici, était de se débarrasser de ces pertes :

« Nous roulons dans l'immensité avec une vitesse inconcevable pour l'esprit : tout tourne, tout est en mouvement autour de nous, l'énergie de mouvement est partout. Il *doit* y avoir un moyen d'utiliser directement cette énergie. Alors, avec l'énergie du milieu, avec la puissance qui lui sera empruntée, avec l'énergie obtenue sans efforts sous toutes ses formes, énergie tirée d'un milieu inépuisable, l'humanité avancera à pas de géants. La simple contemplation de toutes ces possibilités magnifiques développe notre intelligence, fortifie nos espérances et remplit nos cœurs d'une joie suprême. »<sup>2</sup>

La conclusion quelque peu rabat-joie d'Edouard Hospitalier à tout ceci était la suivante :

« Ces paroles qui terminent la conférence de M. Tesla débordent peut-être un peu trop d'enthousiasme ; le poète a, pour un instant, dominé le savant et habile expérimentateur. Malgré ces exagérations, il ne reste pas moins acquis à la science un grand nombre de faits intéressants. M. Tesla est le pionnier d'une voie nouvelle, sans qu'on puisse prévoir encore si elle conduira à un but pratique, ou s'il faudra rebrousser chemin après avoir inutilement exploré le terrain dans lequel elle s'engage. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Aujourd'hui, les aimants permanents sont de nouveau utilisés dans les moteurs électriques, en partie grâce à l'électronique, sur la base de laquelle le fonctionnement des moteurs brushless et des moteurs pas à pas repose. Dans ces moteurs, la commutation décrite en première partie n'est plus assurée par un commutateur mais par un système électronique.

<sup>2</sup> Edouard Hospitalier, « Expériences de M. Tesla sur les courants alternatifs de grande fréquence », *La Nature*, 1891, 2ème semestre, p162 à 167, p167.

<sup>3</sup> Ibid.

Pour réussir à dépasser le coût de la distance de transport imposé par la contrainte de la matière, Nikola Tesla comptait se servir des courants alternatifs à haute fréquence. Il fit plusieurs présentations sur ce thème, dont l'une devant l'*American Institute of Electrical Engineers*, à l'université de Columbia à New York le 20 mai 1891, devant la *National Electric Light Association*, dont le congrès se tenait à ce moment-là à Saint-Louis, au Franklin Institute, ou encore en février 1892 devant l'*Institution of Electrical Engineers* en Angleterre. Il y présenta également les moyens de produire ces courants alternatifs à haute tension et à haute fréquence. En 1891, il construisit un prototype d'alternateur produisant des hautes fréquences. Cependant, comme ces alternateurs n'étaient pas encore disponibles dans l'industrie, il recommandait d'utiliser les appareils suivants, dont le prix était abordable : une bobine de Ruhmkorff, dont le circuit primaire était relié à un condensateur classique du type bouteille de Leyde.

Lors de sa présentation devant l'*American Institute of Electrical Engineers* en 1891, Nikola Tesla démontra expérimentalement qu'un courant alternatif à haute tension et à haute fréquence qui sort d'une des deux bornes d'une bobine d'induction, la seconde étant reliée à la Terre, pouvait servir à l'éclairage. Il y démontra seulement théoriquement qu'un tel courant pouvait également actionner un moteur.

Nikola Tesla considérait qu'il était plus économique, en cas de courants à haute fréquence et à haute tension, d'utiliser la Terre pour le retour du courant :

« Cette communication avec le sol donne lieu à des inconvénients avec les courants constants ou de basse fréquence, à cause des actions chimiques destructives des premiers et des dérangements que causent les seconds dans les circuits voisins ; mais avec les courants à haute fréquence, ces actions n'existent pratiquement pas. »<sup>1</sup>

Il pensait qu'il était même plus sécurisé d'utiliser la Terre que d'utiliser un circuit de retour avec les courants à haute tension et à haute fréquence. Pour cela, la tension devait être d'au moins 30 000 V<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Nikola Tesla, « Sur les phénomènes de vibration à haute fréquence », *La Lumière Electrique*, Volume 49, n°32, 12 août 1893, p287 à 296, p294.

<sup>2</sup> Ibid., p295.

Nikola Tesla souhaitait se libérer complètement de la matérialité des distances. Pour y arriver, il souhaitait se servir cette fois de la résonance électrique. La résonance électrique, qui correspond à la propagation d'une onde électromagnétique produite par un générateur de haute fréquence, permet de se passer de fil de retour pour le courant, voire même de fil tout court. Nikola Tesla précisait : « Les effets de la résonance occupent de plus en plus les ingénieurs et acquièrent une importance considérable dans les applications pratiques des courants alternatifs. »<sup>1</sup>

Voici quels étaient ses projets :

« A propos des effets de résonance et du problème de la transmission de l'énergie sur un seul conducteur que j'envisageais tout à l'heure, je voudrais dire quelques mots sur un sujet que j'ai sans cesse devant l'esprit et qui touche le bien-être de tous. Je veux parler de la transmission de signaux intelligibles, ou peut-être même de la transmission de l'énergie à toute distance sans se servir du tout de fils. Je suis de jour en jour plus convaincu de la praticabilité de cette opération, et quoique je sache fort bien que la grande majorité des savants ne croiront pas de pareils résultats puissent être obtenus pratiquement et immédiatement, tous considèrent néanmoins que les travaux de ces dernières années sont de nature à encourager les expériences dans cette voie. Ma conviction s'est établie d'une façon si ferme que je ne considère pas plus longtemps ce plan de transmission de signaux ou d'énergie comme une simple possibilité théorique, mais comme un problème sérieux qui se pose à l'ingénieur électricien et doit être résolu un jour ou l'autre.

L'idée des transmissions sans fils est la conséquence naturelle des résultats les plus récents des recherches électriques. Quelques enthousiastes ont exprimé leur confiance dans la possibilité de réaliser la téléphonie à toute distance par induction à travers l'air. Je ne saurais pousser l'imagination jusque-là ; mais je crois fermement qu'il est possible, au moyen de puissantes machines, de modifier les conditions électrostatiques de la terre et de transmettre ainsi des signaux intelligibles et peut-être de l'énergie. En fait, qu'est-ce qui s'oppose à la réalisation de ce programme ? Nous savons aujourd'hui que les vibrations électriques peuvent être transmises avec un seul conducteur. Pourquoi, dès lors, ne pas essayer de nous servir de la terre dans ce but ? Il ne faut pas que l'idée de la distance nous effraye. Au voyageur harassé qui compte les kilomètres, la terre peut paraître très grande, mais au plus heureux des hommes, l'astronome, qui contemple les cieux et juge notre globe à cette échelle grandiose, elle paraît bien petite. Il doit en être de même, semble-t-il, pour l'électricien. Quand il

---

<sup>1</sup> Nikola Tesla, « Sur les phénomènes de vibration à haute fréquence », *La Lumière Electrique*, Volume 49, n°33, 19 août 1893, p338 à 346, p338.

considère la vitesse avec laquelle une perturbation électrique se propage à travers la terre, toutes ses idées sur la distance doivent s'évanouir. »<sup>1</sup>

Pour éliminer les distances, la solution de Nikola Tesla consistait à connaître la quantité d'électricité contenue par la Terre et à connaître la période de sa charge électrique. Pour connaître cette période, il souhaitait se servir de la résonance électrique. La majorité des savants en 1893 pensait que la période de la charge électrique terrestre était très faible. Nikola Tesla voulait faire vibrer la Terre électriquement, afin de transmettre un signal (information) ou de l'énergie (force motrice) sans se soucier des distances. La solution la moins économique était celle qui utilisait le réseau de tuyaux d'eau, à l'échelle d'une ville par exemple. Sinon, le mieux était de transmettre directement à travers la Terre. Pour produire ces vibrations, il recommandait d'utiliser un oscillateur électrique, ou une source de courants alternatifs, avec une de ses bornes dans la Terre, la deuxième reliée à un « corps isolé de grande surface »<sup>2</sup>.

Les courants telluriques étaient déjà à l'étude lors de l'Exposition Internationale d'Electricité, pour comprendre leurs effets sur les lignes télégraphiques déjà installées. En France, un certain Blavier présenta des travaux sur ce thème à l'Académie des Sciences en 1883<sup>3</sup>.

*Questions :*

- Est-ce que ce sont les défauts des moteurs à induction conçus par Tesla qui ont amené l'inventeur à trouver cette solution à un problème plus général ? Ses moteurs n'ont pas pu être utilisés d'emblée dans l'industrie.
- Comment cet extrait a-t-il été reçu par la communauté des ingénieurs électriciens ?
- Pourquoi ont-ils ignoré cet appel ?
- Est-ce la vie hors norme de Nikola Tesla qui joua contre la reprise de cette idée par la communauté ? Ou est-ce la primeur d'intérêts économiques sur le court terme ? Une sorte d'économie d'efforts.

---

<sup>1</sup> Ibid., p340-341.

<sup>2</sup> Ibid., p341.

<sup>3</sup> Ph. Delahaye, *Revue Industrielle*, 12 décembre 1883, p498.

Nous retrouvons quoiqu'il en soit ici la dimension magique qui caractérise également les recherches sur les moteurs magnétiques.

#### *b) Expériences pionnières*

##### *1. Bobines de Ruhmkorff*

Edouard Hospitalier donna un compte-rendu des travaux présentés par Nikola Tesla dans la revue *La Nature*. Il y expliquait qu'il n'était pas encore tout à fait convaincu par l'ensemble des explications théoriques données par Nikola Tesla, que certaines parties n'étaient pas nouvelles, mais que malgré tout ils représentaient une belle avancée dans le domaine de la science électrique<sup>1</sup>.

Sur le manque d'originalité, on retrouve en effet certains éléments déjà expérimentés par Heinrich Ruhmkorff, l'inventeur de la bobine d'induction. Cette dernière, d'abord appelée bobine de Ruhmkorff puis bobine de Tesla, servit notamment à la découverte des ondes hertziennes, qui étaient la première démonstration expérimentale des équations de Maxwell (1861) : « C'est Hertz, en effet, qui a donné le moyen pratique d'obtenir des oscillations électriques à haute fréquence, qui a étudié leur mode de propagation et ouvert ainsi la voie à leur emploi thérapeutique, de même qu'il a fourni aux physiciens la possibilité d'aborder le problème de la télégraphie sans fil. »<sup>2</sup> Les bobines servirent également à Lontin, Fonvielle et Elihu Thomson, mentionnés précédemment et qui comme Nikola Tesla citaient les expériences d'Hertz, pour la découverte de leurs moteurs à courant alternatif. Nous avons vu également que le principe de fonctionnement des bobines d'induction fut repris par Lucien Gaulard dans son invention des transformateurs. La même argumentation que nous avons développée à ce moment-là peut également s'appliquer ici pour expliquer que le manque d'originalité est inhérent à toute invention, puisqu'elles reposent sur le principe d'imitation puis amélioration en vue d'une intégration dans l'industrie.

---

<sup>1</sup> Edouard Hospitalier, « Expériences de M. Tesla sur les courants alternatifs de grande fréquence », *La Nature*, 1891, 2ème semestre, p162 à 167, p163.

<sup>2</sup> Adolphe Zimmern (1910), *Les courants de haute fréquence et la d'Arsonvalisation*, Paris : J.-B. Baillière et fils, p9.

## 2. Machines électrostatiques et condensateurs

Avant Nikola Tesla, Heinrich Ruhmkorff avait déjà eu l'idée d'insérer un condensateur dans le circuit primaire de la bobine pour augmenter la tension du courant dans le secondaire. Le condensateur est une forme particulière de machines électrostatiques. Ces dernières ont été inventées peu de temps après la pile électrique, en concurrence avec elle. Elles sont constituées de deux éléments conducteurs séparés par un isolant et chargés en électricité à des niveaux différents, ce qui génère une tension.

En 1891, Nikola Tesla écrivait à propos de l'énergie électrostatique :

« Nous ne pouvons retenir notre étonnement quand nous voyons deux aimants s'attirer ou se repousser l'un l'autre avec une force de centaines de kilogrammes, alors qu'en apparence il n'y a rien entre eux. Nous avons dans nos dynamos industrielles des aimants capables de soutenir en l'air des objets de plusieurs tonnes. Mais que sont ces forces agissant entre aimants, quand on les compare aux attractions et répulsions produites par la force électrostatique, à l'intensité desquelles il ne semble pas y avoir de limite ? Dans les décharges de la foudre, les corps sont souvent chargés à un potentiel si élevé, qu'ils sont projetés avec une force inconcevable et brisés en fragments. »<sup>1</sup>

La tension du courant produit par une pile étant limitée, la bobine de Ruhmkorff et les machines électrostatiques avaient l'avantage de produire de plus hautes tensions. En plus de sa bobine, Heinrich Ruhmkorff était également le constructeur d'une machine électrostatique, inventée par Wilhem Holtz (1836 – 1913), qui convertissait de l'énergie mécanique en énergie électrostatique. Noël Felici, dans son article paru dans le *Bulletin d'histoire de l'électricité* en 1985<sup>2</sup>, rappelle que l'invention du premier moteur électrostatique est attribuée à Benjamin Franklin en 1748 ; c'était une roue électrique<sup>3</sup>. La machine de Holtz est l'une des premières machines électrostatiques dont l'usage fut répandu. Elle fut imaginée par le physicien allemand August Töpler (1836 – 1912), alors qu'il travaillait à l'Institut Polytechnique de Riga, en Lettonie. Sa construction fut améliorée par un autre physicien allemand, Wilhelm Holtz. A Paris, elle était construite par Ruhmkorff. Louis Figuier commentait l'intérêt de cette machine de la manière suivante : « Ce qui fait l'originalité de la machine de M. Holtz, c'est qu'elle a besoin d'être amorcée par une faible source d'électricité, et qu'elle

---

<sup>1</sup> Nikola Tesla, « Sur les phénomènes de vibration à haute fréquence », *La Lumière Electrique*, Volume 49, n°32, 12 août 1893, p287 à 296, p290.

<sup>2</sup> Noël J. Felici (1985), *ibid.*

<sup>3</sup> Correspondances spéciales de l'étranger, *La Lumière Electrique*, Volume 29, n°33, 18 août 1888, p339.

fonctionne sans frottement, à moins qu'on ne veuille admettre que c'est la couche d'air entre les deux disques qui agit comme frottoir. »<sup>1</sup> Wilhelm Holtz découvrit que la machine qu'il avait construite était réversible c'est-à-dire qu'elle pouvait à la fois servir de dynamo et de moteur électrique.

Les machines électrostatiques n'étant pas produites à l'échelle industrielle, elles avaient le désavantage d'être chère à l'achat<sup>2</sup>. Pour expliquer l'absence de développement industriel de ces machines, nous pouvons sans doute mobiliser le même argument que dans le cas des machines à aimant permanent, à savoir que les machines à électro-aimants disposaient d'une sorte de monopole sur le marché des génératrices de courant. A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les machines électrostatiques étaient surtout utilisées pour alimenter en courant continu les machines à rayons cathodiques, ou rayons X, des physiciens dans leurs expériences, ou directement dans les traitements dermatologiques.

#### *4. Recyclage de la chaleur avec les moteurs thermoélectriques*

Nikola Tesla envisagea également de redonner une valeur économique à la chaleur autre que celle d'une perte en construisant des moteurs thermoélectriques. Cette invention retint l'attention de Maurice Leblanc et Maurice Hutin, lorsque Nikola Tesla l'évoqua brièvement lors de sa présentation à Paris en 1892. Apparemment sa remarque sur la thermoélectricité passa presque inaperçue lors de sa présentation. Les deux Maurice la relevèrent, et rédigèrent un article sur la question dans *La Lumière Electrique*<sup>3</sup>, dans lequel ils rappelaient l'historique de la question et soulignaient son intérêt, à la fois pour la « philosophie naturelle » comme elle était appelée en Angleterre (le savant Sir William Thomson fut l'un des précurseurs dans le domaine de la thermoélectricité) et pour l'industrie.

---

<sup>1</sup> Louis Figuier (1867), *Les Merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes, Tome 1, Machine à vapeur, bateaux à vapeur, locomotive et chemins de fer, locomobiles, machine électrique, paratonnerres, pile de Volta, électromagnétisme*, Paris : Jouvett Furne, p490-491.

<sup>2</sup> Noël Felici, *ibid.*

<sup>3</sup> Maurice Hutin et Maurice Leblanc, « Réflexions sur le second principe de la théorie mécanique de la chaleur, à propos de la conférence de M. Tesla », *La Lumière Electrique*, Volume 43, n°10, 5 mars 1892, p451.

Dans un article paru en 1897 dans la revue *L'Eclairage Electrique*, Marcel Deprez indique qu'en 1888, Thomas Edison a lui aussi construit un moteur thermoélectrique dont le physicien Gabriel Lippmann donna la description dans son cours de thermodynamique à la Sorbonne<sup>1</sup>.

## *VIII. Fin de la guerre des courants*

### **1. Lucien Gaulard. Problème de la nationalité**

Pour produire de l'électricité de manière concentrée, on a cherché à utiliser des courants adaptés à un tel mode de production, issu d'une organisation de la production d'énergie passée. A priori le meilleur moyen était d'utiliser des courants alternatifs polyphasés, comme le notait Gilbert Simondon : « (...) Les courants continus des premiers transports d'énergie laissent la place aux courants alternatifs à fréquence constante, adaptés à la production par turbine thermique et par conséquent aussi à la production par turbine hydraulique. »<sup>2</sup>

Comment expliquer que malgré les avantages de son système, Lucien Gaulard n'obtint pas la reconnaissance de ses pairs en son temps ? Cela semble difficile à expliquer. D'après le romancier et journaliste Gustave Le Rouge, tout aurait été la faute du mystérieux docteur Cornélius. Ce qui semble assez probable est qu'il n'était pas assez bien intégré dans la communauté des électriciens. Il n'avait pas les bons diplômes ni le bon titre (ingénieur), et souffrait peut-être d'un manque d'appui institutionnel fort au moment où il a fait sa découverte. Pourtant, comme la plupart des électriciens de cette époque, Lucien Gaulard connaissait les travaux de Marcel Deprez et Gustave Cabanellas, qu'il citait dans ses propres travaux. L'inverse était vrai aussi, Marcel Deprez et Gustave Cabanellas connaissaient les avantages du transformateur. Le premier s'évertua à démontrer que cette invention n'était qu'une farce, l'autre en vanta les mérites.

---

<sup>1</sup> Marcel Deprez, « Sur la transformation directe de la chaleur en énergie électrique », *L'Eclairage Electrique*, 1897, Tome 13, n°43, 23 octobre 1897, p184.

<sup>2</sup> Gilbert Simondon (2012), *ibid.*, p85.

Dans sa querelle écrite avec Lucien Gaulard, Frank Géraldy mettait en garde son adversaire : « il ne faut pas d'ailleurs partir en guerre sans réfléchir »<sup>1</sup>, et mettait en doute sa nationalité : « J'ai répondu, je pense, à tous les points pouvant offrir quelque intérêt dans la lettre des inventeurs anglais. »<sup>2</sup> On peut imaginer que si Frank Géraldy l'attaqua sur ce point, c'était avec l'idée que c'était le seul élément qui avait le potentiel de soulever l'intérêt de la communauté électrique pour sa découverte. Et pourtant, comment expliquer cette attaque sur la nationalité ? Tout au long du 19<sup>ème</sup> siècle, les prix les plus prestigieux en lien avec les découvertes sur l'électricité furent uniquement remis à des savants d'origine étrangère. En 1808, le prix du galvanisme, instauré par Napoléon I<sup>er</sup> et accompagné d'une somme de 3000 francs, fut remis à Sir Humphry Davy (1778 – 1829), professeur de chimie à l'*Institut Royal de Londres* et secrétaire perpétuel de la *Société Royale de Londres*, équivalent anglais de l'*Académie des Sciences*, pour la fabrication d'une pile électrique et la découverte de leurs propriétés chimiques<sup>3</sup>. C'est la seule et unique fois où ce prix fut décerné à quelqu'un. Le prix Volta, instauré par Napoléon III en 1852, fut remis pour la première fois en 1864 à Heinrich Ruhmkorff, d'origine allemande<sup>4</sup>, pour l'invention de ses bobines. Une seconde fois, en 1880, il fut décerné à Alexander Graham Bell, scientifique d'origine écossaise ayant passé sa vie au Canada, pour son invention du téléphone. Il fut remis une troisième fois en 1888 à Zénobe Gramme, d'origine belge, pour son invention de la première dynamo et du premier moteur électrique industriels.

Lucien Gaulard n'en resta pas là non plus et répondit à l'attaque de Frank Géraldy avec une lettre qui commençait ainsi :

« Vous avez bien voulu publier dans votre numéro du 29 décembre dernier, la lettre que je vous ai adressée le 20 du même mois en rectification de l'article publié dans votre journal par M. Géraldy, sur le système Gaulard et Gibbs ; mais, continuant la polémique par lui engagée, M. Géraldy cherche à démontrer dans un nouvel article que nous ne sommes que les plagiaires de ses amis. »<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup> Frank Géraldy, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°52, 29 décembre 1883, p573.

<sup>2</sup> Ibid., p574, *ma mise en italique*.

<sup>3</sup> Amédée Fayol, « Sir Humphry Davy », *La Nature*, 1951, p286-287.

<sup>4</sup> Lors de la guerre contre la Prusse en 1870, Heinrich Ruhmkorff fut autorisé à rester à Paris ; cela faisait vingt ans qu'il y vivait.

<sup>5</sup> Lucien Gaulard, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 11, n°2, 12 janvier 1884, p136.

Sur la question de la mise en doute de sa nationalité, Lucien Gaulard, vexé, lui répondit : « C'est pour la dernière fois, monsieur le directeur, que je vous ennuie de ma correspondance, aussi permettez-moi en terminant de rappeler à M. Géraldy que s'il a le droit de critiquer les inventions, je ne saurais lui reconnaître celui de dénaturer ma nationalité à laquelle je tiens avant tout.

Je suis Français, il le sait bien, et quelle que soit la valeur de l'invention qui nous occupe, c'est à l'abri des couleurs nationales françaises qu'elle a été présentée à l'Exposition de l'aquarium de Westminster, à Londres, et qu'elle sera toujours présentée à l'examen des intéressés. »<sup>1</sup>

Frank Géraldy, qui souhaitait avoir le dernier mot :

« Je crois absolument inutile de répondre à cette lettre que nous insérons conformément à l'usage invariable du journal. M. Gaulard porte la discussion sur un terrain personnel où il ne me convient pas de le suivre. (...) Pour le reste, la parole est à l'expérience. »<sup>2</sup>

Toutes les récompenses que Lucien Gaulard obtint venaient de l'étranger. En plus de sa médaille obtenue à Turin en 1884, l'année suivante il reçut la plus haute distinction de l'*Exposition Internationale des Inventions* de Londres. La même année, il fut nommé chevalier de la couronne d'Italie<sup>3</sup>. Sa candidature avait été présentée pour l'attribution du prix Volta en 1888 mais elle fut refusée. Ce fut finalement Zénobe Gramme qui l'obtint<sup>4</sup>. Au moment de sa mort, J. Bourdin commenta cette attribution ainsi : « Tu verras que le prix qui t'a été refusé, on le donnera à quelque industriel enrichi par l'exploitation de l'invention d'un autre, et bien certainement, ce sera un étranger, car notre généreux pays ne veut pas reconnaître de prophète si, pour son malheur, il est né en France. »<sup>5</sup>

En février 1888, *La Lumière Electrique* annonce dans sa rubrique « Faits divers » que Lucien Gaulard fut arrêté par la police pour avoir crié devant l'Élysée : « Je suis Dieu et je veux la paix universelle »<sup>6</sup>. La cause de cet accès de folie selon eux était le procès qui l'opposa à Thomas Edison indirectement, qui possédait les brevets de Zipernowski, Déri et Blathy déposés après

---

<sup>1</sup> Ibid.

<sup>2</sup> Frank Géraldy, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 11, n°2, 12 janvier 1884, p136.

<sup>3</sup> « Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 17, n°32, 8 août 1885, p285.

<sup>4</sup> « Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 27, n°7, 18 février 1888, p348.

<sup>5</sup> Nécrologie de Lucien Gaulard, *La Lumière Electrique*, Volume 30, n°49, 8 décembre 1888, p498.

<sup>6</sup> « Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 27, n°7, 18 février 1888, p348.

celui de Lucien Gaulard sur une version améliorée de son transformateur. Les intérêts de Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs étaient représentés par la *Société électrique* et la *Banque d'escompte de Paris*, ceux de Zipernowski, Déri et Blathy par l'entreprise de Thomas Edison.

Apparemment c'est à l'Exposition de Turin que cela se joua :

« Là, à Turin, avec son caractère expansif, enthousiaste, sans aucune méfiance, Gaulard, plein de son œuvre, des modifications qu'il cherchait, qu'il trouvait, n'avait de secret pour personne ; c'était pour ainsi dire en public qu'il travaillait ; moins confiant, il se fût épargné dans l'avenir bien des amertumes. »<sup>1</sup>

L'un des arguments mis en avant par les trois savants étaient que leur transformateur utilisait une masse moins élevée de cuivre que celui de Lucien Gaulard et John Gibbs.

En 1893, le conflit se résolut ainsi :

« La Cour d'appel d'Orléans a rendu, le 29 juin 1893, un arrêt d'une importance considérable pour l'industrie électrique française. Cet arrêt reconnaît la validité des brevets français pris en 1885, par MM. Zipernowski et Déri, pour le montage des transformateurs en dérivation, et avec M. Blathy, pour le transformateur à noyau magnétique fermé sans pôles.

En 1886, MM. Zipernowski, Déri et Blathy avaient fait constater que la Société d'éclairage électrique de Tours se servait d'appareils et de dispositions constituant, selon eux, une contrefaçon de leurs inventions. Ces appareils étant du système de MM. Gaulard et Gibbs, dont l'exploitation avait été cédée à la Société électrique par la Banque d'escompte de Paris, c'est à ces deux Sociétés qu'un procès fut intenté.

Or, le tribunal civil de Tours a débouté MM. Zipernowski, Déri et Blathy de leur demande et a déclaré nuls leurs deux brevets.

Les plaignants ont déféré ce jugement à la Cour d'appel d'Orléans, et celle-ci, après avoir entendu le rapport des experts Fribourg, Jouselin et de Parville a rendu, à la date du 29 juin 1893, un arrêt dont voici les principaux considérants :

[pour le détail de ces « principaux considérants », cf. Texte de *La Lumière Electrique*, volume 49, p397-398]. »<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Nécrologie de Lucien Gaulard, *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1889, p168.

<sup>2</sup> *La Lumière Electrique*, volume 49, p397-398.

Nous sommes donc ici au cœur de la bataille des courants, que l'historien états-unien Paul A. David situe aux années 1887-1888 et qui opposa les partisans du courant continu, Thomas Edison en tête, à ceux du courant alternatif, représentés par George Westinghouse. Selon nous, ça n'était pas de simples échos de la guerre des courants que l'on entendait en Europe, la guerre y était bel et bien déclarée aussi. Cette bataille commença selon nous dès 1884, date à laquelle l'utilisation industrielle du transformateur fut démontrée publiquement. Pour l'historien, elle eut lieu dans la presse nord-américaine principalement, avec des échos en Europe. Après tout le pionnier de l'industrie électrique était en train de se faire détrôner, il était donc normal que tout le monde en parle. D'énormes investissements avaient été faits par Thomas Edison pour fournir l'électricité au plus grand nombre, en courant continu. D'où une lutte entre le maître de l'industrie à ses débuts et le nouveau venu, George Westinghouse. Paul David qualifia cette bataille de diversion qui aurait permis à Thomas Edison de revaloriser son stock d'actions avant de se les faire racheter par J.P. Morgan à partir de 1889, qui organisa la fusion avec *Thomson-Houston* en 1892 pour créer *General Electric*.

En 1885, George Westinghouse racheta les droits d'exploitation du brevet de Lucien Gaulard aux Etats-Unis pour un montant de \$ 50 000. L'ingénieur William Stanley fut engagé par George Westinghouse comme consultant pour modifier et le rendre commercialisable sur place, ce qu'il parvint à faire à l'automne 1885<sup>1</sup>.

Thomas Edison finit par quitter cette industrie pour se consacrer à d'autres (phonographie, cinéma, exploitation minière)<sup>2</sup>.

Malgré les hésitations du groupe réuni autour de *La Lumière Electrique*, pour la *Société Internationale des Electriciens*, c'était bien Lucien Gaulard l'inventeur de la distribution de l'énergie électrique à grande distance avec des courants alternatifs et des transformateurs : « D'une expérience de laboratoire, il a tiré une méthode et des moyens d'une application industrielle

---

<sup>1</sup> Matthew Josephson (1992), *Edison: a biography*, John Wiley & sons, p345.

<sup>2</sup> Paul David, « The Hero and the Herd in Technology History : Reflections on Thomas Edison and the Battle of the Systems », in *Favorites of fortune : technology, growth, and economic development since the industrial revolution*, ed. by Patrice Higonnet, David S. Landes, Henry Rosovsky, Cambridge, Mass. : Harvard University Press, 1991, p103.

les plus féconds. »<sup>1</sup>. Romuald-Victor Picou, ingénieur de la *Compagnie Continentale Edison*, donna une conférence en 1890 à l'Hôtel des sociétés savantes à Paris sur « l'électricité et ses applications à l'usage domestique » et eut rétrospectivement les mots suivants : « On a trouvé le transformateur, dont l'invention est due à M. Gaulard, qui malheureusement n'a pas été assez secondé dans son invention, bien qu'il l'ait défendue avec une véritable foi d'apôtre. M. Gaulard est mort sans avoir eu la satisfaction d'assister à l'entier développement de son système. »<sup>2</sup> En effet, Lucien Gaulard mourut prématurément le 26 novembre 1888 à l'hôpital Sainte-Anne, un mois et demi après Gustave Cabanellas. Leurs deux nécrologies se suivent dans le *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*.

En 1889, la Société italienne d'électricité décida de faire construire une statue à son effigie à Lanzo, là où les premiers essais avec son transformateur eurent lieu. Un appel aux financements de six lignes fut publié dans la rubrique « Faits divers » de *La Lumière Electrique*<sup>3</sup>.

## 2. Carrière de Marcel Deprez

Après sa dernière expérience à Creil en 1885 et son installation à Bourgneuf, Marcel Deprez finit par se retirer des débats. Sa carrière d'électricien ne s'arrêta pas là pour autant. Il devint membre de la section de mécanique de l'*Académie des Sciences* en 1886, et en 1890 le premier professeur d'électricité du *Conservatoire Nationale des Arts et Métiers* (CNAM)<sup>4</sup>. Il donna également des cours au Collège de France, en tant que suppléant de Joseph Bertrand<sup>5</sup>. En 1889, Marcel Deprez, Cornelius Herz et Alphonse de Rothschild furent nommés tous les trois membres honoraires de la *National Electric Light Association*.

---

<sup>1</sup> Nécrologie de Lucien Gaulard, *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1889, p168.

<sup>2</sup> « Variétés : Adresse inaugurale sur la distribution de l'électricité », *La Lumière Electrique*, Volume 35, n°6, 8 février 1890, p294 à 296, p295.

<sup>3</sup> « Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 32, n°21, 25 mai 1889, p397.

<sup>4</sup> Les deux institutions sont liées : l'Académie des Sciences est consultée pour la nomination d'un professeur à une chaire du CNAM.

<sup>5</sup> François Caron et Fabienne Cardot (1991), *ibid.*, p50.

L'historien des sciences Girolamo Ramunni rédigea une notice biographique peu flatteuse pour Marcel Deprez dans les dictionnaires du CNAM. Il décrivait les liens avec son appui institutionnel Joseph Bertrand ainsi :

« Polytechnicien, fils d'un polytechnicien proche des saint-simoniens, Bertrand, élevé par son oncle, le mathématicien Duhamel, s'était initié aux questions industrielles chez les Péreire. De son passage à Polytechnique il gardait un souvenir peu agréable ; il critiquait les critères d'évaluation des élèves à chaque occasion, malgré le fait qu'il continuait d'y enseigner ; la raison, selon Berthelot, était que dans cette école « les rangs sont assignés..., d'après un système de moyennes, plus favorables à la médiocrité distinguée qu'au talent hors ligne. »<sup>1</sup>

[...]

Pour souligner sa critique du système des grandes écoles, Bertrand cherchait à découvrir, parmi les exclus ou les derniers classés les vocations scientifiques en train d'éclore. Son point d'orgueil était d'avoir découvert Léon Foucault dont il se fit « le promoteur convaincu et le soutien acharné... »<sup>2</sup>. Il est probable qu'il ait espéré renouveler cette réussite avec Marcel Deprez. »<sup>3</sup>

Girolamo Ramunni nous apprend également que Marcel Deprez fut le seul à présenter un système de transport d'énergie électrique à distance lors de l'Exposition internationale d'électricité en 1881 car les organisateurs, dans leur volonté d'attirer des investisseurs, pensaient qu'il valait mieux éviter de présenter plusieurs systèmes. En retour, ceux qui avaient aussi des systèmes de transport d'électricité à distance à présenter s'employèrent à critiquer les expériences de Marcel Deprez qui suivirent. Ce n'est pourtant pas tout à fait vrai puisqu'il y eut au moins deux autres expériences de transport de force par l'électricité lors de l'Exposition de 1881 : le tramway électrique de Siemens, qui circulait entre les bâtiments de l'Exposition sur une ligne de 500m. La seconde est la démonstration des constructeurs de machines outils Ducommun et Steinlen, basés à Mulhouse en Alsace, qui utilisèrent deux machines Gramme distantes de 580m. A noter qu'à cette époque, l'Alsace était une région allemande. On voit donc que le contexte politique de la France a sans doute joué un rôle non négligeable dans cette guerre des courants.

---

<sup>1</sup> Source : discours prononcé par M. Berthelot lors de la séance publique de réception tenue par l'Académie française pour la réception de M. Berthelot, 2 mai 1901, Paris, 1901, p10.

<sup>2</sup> Ibid., p29.

<sup>3</sup> Girolamo Ramunni (1994), « Marcel Deprez (1843-1918), professeur d'électricité industrielle (1890-1918) », in Claudine Fontanon et André Grelon (dir.), *Les Professeurs du Conservatoire national des arts et métiers. Dictionnaire biographique 1794-1955*. Paris, INRP et CNAM, t. I, p405-418, p406.

Les théories de Marcel Deprez furent dans la pratique très coûteuses à vérifier, les expériences durent être répétées plusieurs fois. Il eut cependant accès des moyens financiers très larges. Nous avons vu que leurs sources étaient alors très puissantes, tout en étant impliquées dans l'un des plus grands scandales de la Troisième République. Il parvint tant bien que mal à démontrer que l'électricité pouvait être transportée sur de longues distances, cependant son système, de la construction des machines en passant par le mode de distribution du courant continu, n'était pas assez économique.

On peut quand même se demander comment la renommée de Marcel Deprez a pu autant éclipser celle d'Hippolyte Fontaine en France. Une hypothèse serait que le premier, Hippolyte Fontaine, s'est occupé de démontrer que l'électricité pouvait être distribuée comme force motrice. Tandis que neuf ans plus tard, après la démonstration de Vienne, ce que Marcel Deprez chercha à démontrer au monde industriel était que l'électricité pouvait être transportée de manière économique sur de longues distances et en quantité suffisante non pas seulement pour l'éclairage mais pour actionner un moteur électrique. Thomas C. Martin rappela qu'à l'issue de sa dernière expérience à Creil en 1886, la preuve n'était toujours pas fournie puisque l'installation de Marcel Deprez coûtait toujours plus cher que l'installation d'une usine à vapeur là où le besoin de force motrice se trouvait, sans transport donc, frais de maintenance inclus<sup>1</sup>. Pour rivaliser avec les autres formes de force motrice, il fallait donc pouvoir transporter économiquement des milliers voire des dizaines de milliers de chevaux. L'enjeu était de centraliser plus encore.

Serait-ce également pour cette raison : des gains plus gros issus du transport de l'électricité à grande distance plutôt que de la vente du moteur électrique, que Nikola Tesla et son prototype de moteur électrique ne trouvèrent aucun investisseur en France entre 1882 et 1884 ? Peut-être Nikola Tesla l'avait-il compris lui-même puisqu'en 1888, c'est un système complet de production, transport et distribution qu'il présenta aux Etats-Unis.

---

<sup>1</sup> Thomas Commerford Martin (1886), *ibid.*

### 3. Nikola Tesla, porte parole des Modernes ?

En 1896, le système de Nikola Tesla avec courants diphasés fut installé sur les chutes du Niagara : « Ce qui consacra pratiquement l'adoption de ce système, ce fut la constitution, en 1896, par la Niagara Falls Power Cy, d'une commission internationale comprenant notamment Lord Kelvin (Sir William Thomson), Mascart, Edison, etc..., dont la mission fut de rechercher, pour ladite société, la meilleure utilisation au transport électrique de l'énergie des chutes du Niagara. Après enquête, la commission choisit le système Tesla, malgré l'opposition de Lord Kelvin et d'Edison, restés partisans du courant continu. »<sup>1</sup>

Le projet était à l'étude depuis 1893. La revue *La Lumière Electrique* nous apprend :

« L'utilisation des chutes du Niagara a été pendant longtemps un thème favori des ingénieurs, mais ce n'est que depuis l'époque où la transmission de l'énergie par l'électricité est devenue faisable que ce projet a pu entrer dans le domaine de la réalisation pratique.

L'exécution en est actuellement entre les mains d'un des plus puissants syndicats de capitalistes new-yorkais qui ait jamais été formé. Sous ses auspices, le projet a été pour la première fois étudié à fond aux points de vue technique, financier et industriel. Après cet examen préalable, des concessions ont été acquises et diverses compagnies formées. »<sup>2</sup>

Nikola Tesla faisait partie des ingénieurs qui rêvaient d'utiliser l'énergie des chutes du Niagara. Il put ainsi réaliser son rêve d'enfant, comme il le raconte lui-même :

« In the schoolroom there were a few mechanical models which interested me and turned my attention to water turbines. I constructed many of these and found great pleasure in operating them. How extraordinary was my life an incident may illustrate. My uncle had no use for this kind of pastime and more than once rebuked me. I was fascinated by a description of Niagara Falls I had perused, and pictured in my imagination a big wheel run by the Falls. I told my uncle that I would go to America and carry out this scheme. Thirty years later I saw my ideas carried out at Niagara and marveled at the unfathomable mystery of the mind. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Albert Turpain, « Sur les chemins de la découverte. L'œuvre de Nicolas Tesla », *La Nature*, 1939, 1<sup>er</sup> semestre, p164.

<sup>2</sup> George Forbes, « Variétés. La transmission électrique de la puissance des chutes du Niagara », *La Lumière Electrique*, Volume 50, n°49, 9 décembre 1893, p492.

<sup>3</sup> Nikola Tesla, « My inventions », *Electrical Experimenter*, February-June and October 1919, <http://www.tfcbooks.com/tesla/1919-00-00.htm>

Intéressons-nous ici au mythe autour de la personnalité de Nikola Tesla. Ses travaux pionniers sur les champs tournants furent présentés quasi-simultanément avec ceux de Galileo Ferraris. En 1887, Nikola Tesla déposa un brevet, en mars 1888, la théorie de Galileo Ferraris sur les champs tournants fut publiée et en mai 1888, une démonstration publique du moteur de Nikola Tesla eut lieu lors de la conférence de l'*American Institute of Electrical Engineers*. A propos de la simultanéité de cette découverte scientifique, Gabriel Tarde écrivait :

« On dit que les grands génies, les grands inventeurs se rencontrent ; mais, d'abord, ces coïncidences sont fort rares. Puis, quand elles sont avérées, elles ont toujours leur source dans un fonds d'instruction commune où ont puisé indépendamment l'un de l'autre les deux auteurs de la même invention ; et ce fonds consiste en un amas de traditions du passé, d'expériences brutes ou plus ou moins organisées, et transmises imitativement par le grand véhicule de toutes les imitations, le langage. »<sup>1</sup>

Pour le physicien Albert Turpain (1867 – 1952), auteur d'un article sur Nikola Tesla dans *La Nature* en 1939<sup>2</sup>, concernant les courants triphasés et les champs magnétiques, Galileo Ferraris était la seule référence retenue « en France, en Roumanie, dans les pays de langue française »<sup>3</sup>. Selon lui, Nikola Tesla connut une trajectoire similaire à celle de Pacinotti qui a découvert la dynamo en 1860 lorsqu'il était professeur à l'université de Pise, c'est-à-dire que Nikola Tesla aurait été une sorte de savant maudit, non reconnu à sa juste valeur par ses pairs. Cette vision est à nuancer puisque dès 1894, soit à peine six ans après le dépôt de son brevet pour son système de transport de force par l'électricité et douze ans après le début de sa carrière, Thomas C. Martin, rédacteur en chef du journal *The Electrical Engineer*, publia un ouvrage réunissant tous les écrits de Nikola Tesla :

« L'éditeur de *The Electrical Engineer* M. T. C. Martin, aidé de son associé M. J. Wetzler, a eu l'idée de réunir en un seul volume les travaux épars de M. Tesla, autant, dit-il, pour rendre justice à ses inventions, que parce qu'il y a profit intellectuel à suivre l'évolution d'un esprit vigoureux et original. On trouve dans ce volume ses conférences, ses divers articles, les discussions auxquelles il a pris part, et une description de toutes ses inventions connues, mais principalement la part qu'il a prise à

---

<sup>1</sup> Gabriel Tarde (1895), *ibid.*, p16.

<sup>2</sup> Albert Turpain (1939), *ibid.*, p163.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p164.

l'évolution des courants polyphasés et ses célèbres recherches sur les courants de haute fréquence et de haute tension. »<sup>1</sup>

Madeleine Akrich, Bruno Latour et Michel Callon ont écrit sur le sujet des savants connus en leur temps mais au parcours mythifié par la suite. Ils citent le cas du botaniste Gregor Mendel (1822 – 1884), qui avait bel et bien été reconnu de son vivant<sup>2</sup>. Ils évoquent aussi le cas de mythification inverse de Thomas Edison, à la suite des travaux de Thomas Hughes<sup>3</sup>. Au départ vu comme un bricoleur autodidacte de génie, Thomas Hughes l'a plutôt décrit comme un entrepreneur de génie :

« Hughes a reconstitué minutieusement, en consultant notamment les carnets de notes d'Edison, les moindres péripéties qui ont jalonné cette véritable épopée des temps modernes. La fresque obtenue est impressionnante. Au départ une certitude et une volonté tenace : remplacer le gaz par l'électricité comme source d'éclairage domestique. Ce que fait ensuite Edison ne ressemble que de très loin à ce que l'on imagine. Edison est tout sauf un bricoleur de génie. C'est un organisateur, un entrepreneur, un stratège, un chercheur, un homme de relations publiques, et si génie il y a, c'est dans cette capacité de passer d'un rôle à un autre et de jouer chacun d'entre eux avec un égal bonheur, qu'il faut le placer. »<sup>4</sup>

Les trois sociologues de l'innovation se servent ici du cas de Thomas Edison pour illustrer leur définition de l'innovation, qui tourne autour du choix des bons porte-paroles et de la notion de représentativité, ainsi que de son côté incertain, que l'intuition de l'innovateur en devenir cherche à maîtriser : « Ce n'est qu'après coup, mais seulement après coup, que l'on saura sans ambiguïté si les porte parole retenus étaient légitimes »<sup>5</sup>. Plus loin, à propos de la lampe à incandescence, Madeleine Akrich, Bruno Latour et Michel Callon mettent l'accent sur le laboratoire de Menlo Park, où les porte-paroles de Thomas Edison travaillaient et vivaient en communauté. Selon eux, Thomas Edison a réussi à « traduire une stratégie économique en

---

<sup>1</sup> A. Hess (1894), *ibid.*, p46.

<sup>2</sup> Madeleine Akrich, Michel Callon, Bruno Latour, « A quoi tient le succès des innovations ? 1 : L'art de l'intéressement ; 2 : Le choix des porte-parole », *Gérer et Comprendre. Annales des Mines, Les Annales des Mines*, 1988, pp4-17 & 14-29.

<sup>3</sup> Thomas P. Hughes (1983), *Networks of Power: Electrification in Western Societies, 1880-1930*, Baltimore, John Hopkins University Press.

<sup>4</sup> Madeleine Akrich, Michel Callon, Bruno Latour (1988), *ibid.*, p10.

<sup>5</sup> *Ibid.*, p13.

actions de recherche »<sup>1</sup>.

Il y eut le même type de travail de mythification autour de Nikola Tesla. Il n'a jamais été un savant méconnu, sauf peut-être entre 1882 et 1884. Très vite, son talent fut reconnu et il devint une star de l'électricité. Ses présentations dans les diverses sociétés savantes de l'époque faisaient sensation et son génie fut d'emblée encensé. A tel point que ce que les emprunts qu'il fit à d'autres génies furent parfois laissés de côté, comme par exemple sa réutilisation de la bobine d'induction d'Heinrich Ruhmkorff.

Une autre illustration de « l'importance de la notion de représentativité »<sup>2</sup> se retrouve aujourd'hui dans l'entreprise *Tesla*, qui commercialise des voitures électriques aux Etats-Unis. Elle a été fondée par Elon Musk, qui a très certainement lu beaucoup de biographies de Thomas Edison. Bruno Latour et Madeleine Akrich décrivent Thomas Edison comme un ambitieux rêvant de faire passer les Etats-Unis du gaz à l'électricité<sup>3</sup>. Elon Musk rêve de rendre les voyages dans l'espace abordables, que chaque maison ait sa propre batterie de stockage d'électricité, de réaliser le transport de personnes aussi rapide que l'éclair avec son projet d'Hyperloop, dans lequel la SNCF a investi, etc. (car sa liste de projets est longue). Un peu comme Thomas Edison, en nommant son entreprise de voitures électriques *Tesla*, il se sert de l'image du savant génial et isolé. Ni lui, ni Nikola Tesla ne correspondent pourtant à cette image.

Si l'on se réfère aux travaux de Patrick McGuire et Mark Granovetter, ces derniers semblent soutenir que si le courant alternatif est devenu la norme, c'est simplement parce que les entreprises *Westinghouse* et *General Electric* avaient des intérêts dans le matériel fonctionnant avec des courants alternatifs. *General Electric*, née de la fusion entre les entreprises *Edison* et la *Thomson-Houston Company* qui mit Thomas Edison hors course, exploitaient des lignes en courant alternatif. *JP Morgan*, qui soutenait financièrement *General Electric*, ne voulait pas que Thomas Edison puisse faire des profits avec ses brevets en courant continu. C'était peut-être

---

<sup>1</sup> Ibid., p17.

<sup>2</sup> Ibid., p12.

<sup>3</sup> Ibid., p11.

tout compte fait lui le philanthrope maudit, à défaut de savant maudit puisqu'apparemment il avait surtout un rôle d'acheteur de brevets.

Il y a également le cas de Richard Arkwright, cité par Lewis Mumford, qui perfectionna l'armée industrielle. Comme Thomas Edison, c'était un capitaliste qui réussit tout en étant considéré comme un grand inventeur. Pour Lewis Mumford cependant, il aurait lui aussi surtout repris aux autres<sup>1</sup>. Son cas ressemble donc à celui de Thomas Edison. Doit-on en conclure que le succès est nécessairement suspect ?

Il est en tout cas difficile de s'en sortir lorsque l'on se base uniquement sur l'image renvoyée par des personnalités, et plus simple d'affirmer que ce recours à la représentativité n'existe qu'« au pays de Descartes »<sup>2</sup>, chez les Modernes donc, pour reprendre le vocabulaire utilisé par Bruno Latour.

#### 4. Postérité croisée de René Thury et Gustave Cabanellas

La bataille des courants et la représentation bipolaire de l'industrie électrique, peut-être créée par Thomas Edison et ses collègues dans le but de préserver leurs intérêts, a sans doute eu pour effet, entre autres, d'éclipser la variété des systèmes disponibles. La réalisation expérimentale des idées de Gustave Cabanellas coûta moins cher que celle de Marcel Deprez, la difficulté fut plutôt pour lui de trouver les financements nécessaires. Le système qu'il proposait était suffisamment économique pour être appliqué à l'échelle industrielle. C'est un ingénieur suisse, René Thury, qui s'en chargea, notamment en Suisse, en Italie et en France.

En 1906, dans son premier discours en tant que président de la *Société Internationale des Electriciens* en 1906, Maurice Leblanc prononça les mots suivants :

« G. Cabanellas mourut prématurément, mais ses idées ont été reprises et mises en pratique par M. Thury, avec le succès que vous savez. (...) »

---

<sup>1</sup> Lewis Mumford (1934), *ibid.*, p161.

<sup>2</sup> Madeleine Akrich, Michel Callon, Bruno Latour (1988), *ibid.*, p10.

M. Marcel Deprez était le champion du courant continu à tension constante ; Cabanellas, celui du courant continu à intensité constante. (...)

Tout le monde est d'accord que c'est le meilleur système de transport de l'énergie en grande masse, mais la plupart des exploitants hésitent à adopter ce système parce que M. Thury est seul à le pratiquer. Aussi M. Thury réclame-t-il des concurrents. »<sup>1</sup>

Tout le monde se lançait alors dans la construction de machines et de systèmes à courant alternatif triphasé. Maurice Leblanc recommandait d'utiliser plutôt des moteurs à courant continu, alimentés par une distribution du système de Gustave Cabanellas, repris par René Thury. Ce système fut installé dans de nombreuses villes en Suisse.

En effet, malgré le succès et l'intérêt du système de Nikola Tesla en courant alternatif qui permettait de se débarrasser du commutateur, le courant continu n'avait pas encore dit son dernier mot pour le transport d'énergie à longue distance, du moins en Europe, grâce au système Thury qui était encore appliqué avec succès. La première application industrielle eut lieu en 1890 à Gênes, en Italie, sur une distance de 48km<sup>2</sup>. A Lausanne, en 1902, on en inaugura l'installation en vue de transporter le courant depuis des chutes d'eau situées à 56km, à Saint-Maurice, jusqu'à la ville. Le courant était généré par 10 machines Thury à 6 pôles, reliées par deux à cinq turbines hydrauliques. Chaque génératrice produisait 2 000 V environ, les 10 machines étant reliées en série, elles envoyaient sur la ligne au total une tension de 20 000 V environ. La ligne de transport était formée de deux câbles aériens en cuivre de 150mm<sup>2</sup> de section. A l'arrivée, cinq moteurs étaient installés, dont 4 reliés à des alternateurs triphasés pour la distribution de l'éclairage, le 5<sup>ème</sup> étant relié à une autre dynamo Thury en courant continu pour la force motrice.

Lorsque le projet fut lancé, on hésitait pour la distribution d'éclairage en ville entre les courants polyphasés et le système Thury. La comparaison des dépenses de premier établissement aurait dû faire que le système Thury l'emporta : « Le capital de premier établissement n'était en effet que de 7 365 000 fr pour le système Thury, tandis qu'il aurait atteint 8 105

---

<sup>1</sup> Maurice Leblanc, « Allocution du président de la Société Internationale des Electriciens », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1906, p211 à 217, p214.

<sup>2</sup> Edouard Hospitalier (1902), *ibid.*, p6-25.

000 fr pour l'utilisation par courant triphasés, soit une différence de 740 000 francs en faveur du continu. »<sup>1</sup>

Et pourtant, le choix se porta finalement sur le courant triphasé pour la distribution en ville, « pour des raisons complètement étrangères au côté technique »<sup>2</sup> d'après l'article de *L'Eclairage Electrique*. Il en fut de même pour la ville de Saint-Maurice. L'entreprise de René Thury, la *Compagnie de l'Industrie Electrique*, y installa quand même les centrales puisqu'elle fabriquait aussi des machines à courant alternatif.

En 1907, le système Thury fut installé pour transporter l'électricité depuis Moutiers, en Savoie, jusqu'à Lyon. Le reste de la région était déjà desservi en courant alternatif triphasé mais le nouveau système Thury allait être utilisée par les tramways électriques de la ville, d'où le choix du courant continu<sup>3</sup>.

En ce qui concerne les honneurs, il reçut un grand prix de collaborateur en 1900 lors de l'Exposition universelle à Paris. En 1907, il fut promu chevalier de la Légion d'honneur. En 1909, il fut nommé membre d'honneur de *l'Association Suisse des Electriciens* et de la *Société Internationale des Electriciens*. Quant à Gustave Cabanellas, la *Société des Ingénieurs Civils* lui décerna une médaille d'or en 1883 pour son mémoire sur le transport électrique de la puissance mécanique. En 1884, *l'Académie des Sciences* vota en sa faveur un encouragement pour une médaille de 1 000 francs, issus des fonds du grand prix des Sciences mathématiques.

Ce qui reste difficilement explicable puisque le mémoire de Gustave Cabanellas est écrit en 1887 et que les premières installations de René Thury datent d'avant 1887 : pourquoi Gustave Cabanellas ne mentionne-t-il pas les travaux de René Thury ? A noter que la législation en matière de brevet était la suivante : « (...) Est déchu de tous ses droits « le breveté qui n'aura pas mis en exploitation sa découverte ou invention en France dans le délai de deux ans à

---

<sup>1</sup> C.-F. Guilbert, « Transport d'énergie Saint-Maurice – Lausanne. Système Thury », *L'Eclairage Electrique*, Volume 32, n°28, 12 juillet 1902, p42.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> Jean Reyval, « Transport d'énergie électrique de Moutiers à Lyon », *L'Eclairage Electrique*, 5 janvier 1907, p13.

dater du jour de la signature du brevet... ». »<sup>1</sup> René Thury était sans doute dans ses droits d'un point de vue légal, mais d'un point de vue éthique, Gustave Cabanellas est quand même mort bien jeune. Il est finalement lui aussi mort prématurément, d'une fluxion de poitrine le 8 octobre 1888, la même année que Lucien Gaulard<sup>2</sup>. En 1915, Nikola Tesla dira de lui qu'il est « mort de chagrin »<sup>3</sup>. A sa mort, Jules Armengaud rédigea une nécrologie de quatre pages, lue devant la *Société des Ingénieurs Civils*, la plus longue nécrologie trouvée parmi celle de *La Lumière Electrique* et de la *Société Internationale des Electriciens*. Dedans il écrit :

« Pendant toute sa polémique avec M. Marcel Deprez ; Cabanellas fit preuve d'un grand courage et d'une volonté opiniâtre pour combattre un adversaire aussi distingué, déjà défendu et appuyé par l'Institut dont ses mérites devaient plus tard lui ouvrir l'accès. Dans cette circonstance notre collègue, malgré les rudes assauts qu'il eut à soutenir, malgré les séductions flatteuses dont il fut l'objet, nous donna à admirer la plus belle qualité de l'homme et du savant, je veux dire l'indépendance du caractère.

Si le monde savant se montre quelque fois un peu dur pour Cabanellas, il rencontra une douce compensation dans l'accueil bienveillant que lui fit notre Société, qui, dégagée heureusement de toute attache officielle, laisse parler librement tous les hommes de bonne volonté qu'anime une ardeur sincère de la vérité. »<sup>4</sup>

## 5. La passion d'innover

Pour Gabriel Tarde, une invention a besoin pour se propager que l'on croit en elle : « Une découverte, une invention apparaît. Il y a deux faits à noter : ses augmentations de foi, par propagation de proche en proche ; et les diminutions de foi qu'elle fait subir à une découverte ou une invention ayant le même objet ou répondant au même besoin, quand elle vient à la rencontrer. »<sup>5</sup>

De plus, selon lui, toute découverte a une dimension passionnelle : « Une invention ne fait que satisfaire ou provoquer un désir (...). »<sup>6</sup>

---

<sup>1</sup> Girolami Rammuni (1994), *ibid.*, p408.

<sup>2</sup> Gustave Cabanellas est mort d'une pneumonie.

<sup>3</sup> Nikola Tesla, « Some Personal Recollections », *Scientific American*, 5 juin 1915, <http://www.tfcbooks.com/tesla/1915-06-05.htm>

<sup>4</sup> Jules Armengaud, Nécrologie de Gustave Cabanellas, *Comptes rendus de la Société des Ingénieurs Civils*.

<sup>5</sup> Gabriel Tarde (1895), *ibid.*, p167.

<sup>6</sup> *Ibid.*, p173.

Ainsi croyance et désir (de profit, de gloire, etc.) sont les deux « quantités sociales »<sup>1</sup> nécessaires pour qu'il y ait invention puis imitation. Il note que la combinaison de croyance et désir peut aussi engendrer des impostures, lorsque la passion grandit sur une illusion : « ainsi se répand une contagion politique ou religieuse »<sup>2</sup>.

Lorsque deux inventions sont découvertes simultanément, Gabriel Tarde évoque deux scénarios possibles. Soit l'une se substitue à l'autre, soit les deux se cumulent. Pour expliquer cela, il fait une analogie avec les ondes en physique :

« Quand deux ondes, deux choses physiques à peu près semblables, après s'être propagées séparément à partir de deux foyers distincts, viennent à se rencontrer dans un même être physique, dans une même particule de matière, leurs impulsions se fortifient ou se neutralisent, suivant qu'elles ont lieu dans le même sens ou en deux sens précisément contraires sur la même ligne droite. Dans le premier cas, une onde nouvelle, complexe et plus forte surgit, qui tend elle-même à se propager. Dans le second cas, il y a lutte et destruction partielle jusqu'à ce que l'une des deux rivales l'emporte sur l'autre. »<sup>3</sup>

Il y a confrontation entre deux inventions lorsqu'elles répondent au même désir, ou bien lorsqu'elles répondent à deux désirs différents, mais que l'origine de l'un de ces désirs contredit l'autre. Pour Gabriel Tarde, on retrouve cette notion de dualité en politique. Il y a ceux qui sont pour la ligne politique d'un gouvernement, et ceux qui sont contre, peu important le nombre de partis et leurs divergences. De manière analogue, après une découverte, c'est soit oui au projet de sa mise en application, soit non. La solution en courant continu avec de hautes tensions produites par plusieurs petites machines reliées en série imaginée par Gustave Cabanellas et appliquée par René Thury est-elle celle qui a permis de sortir de la dualité entre le courant continu à haute tension issue d'une seule machine de Marcel Deprez et le courant alternatif de Lucien Gaulard et Nikola Tesla ?

Quoiqu'il en soit, cette dimension passionnelle, nous la retrouvons dans toutes les querelles évoquées, celles entre Marcel Deprez et Gustave Cabanellas, entre Marcel Deprez et Lucien

---

<sup>1</sup> Ibid., p157.

<sup>2</sup> Ibid., p32.

<sup>3</sup> Ibid., p26.

Gaulard, entre Thomas Edison et George Westinghouse, Thomas Edison et Nikola Tesla, car sans passion pas de querelle. Pour Bruno Latour aussi, passion et innovation sont indissociables :

« Qu'il s'agisse d'identifier le comportement des électrons ou des enzymes, de cerner les attentes des consommateurs ou la stratégie des concurrents, l'innovateur ne peut que s'en remettre à quelques (trop) rares interlocuteurs dont il ne sait jamais complètement de qui ou de quoi ils sont représentatifs et s'ils le sont vraiment. Le doute, la confiance, puis la gratitude et l'admiration, ou au contraire la suspicion, la défiance et bientôt la haine, sont au cœur de l'innovation. Ces passions ne viennent pas parasiter le travail de l'ingénieur ou du chercheur : elles en sont les éléments constitutifs les plus intimes et les plus fondamentaux. C'est pourquoi il est vain de vouloir séparer les facteurs humains et les facteurs techniques, les passions et la raison. »<sup>1</sup>

## 6. Le génie collectif

De manière à relativiser ceci, pour nombre de penseurs du 19<sup>ème</sup> siècle et d'aujourd'hui, le génie individuel n'existe pas, ce qui permettrait, si cela était vrai, de sortir des querelles.

Que René Thury ait été inspiré par Gustave Cabanellas ou l'inverse, un article paru en 1888 dans le *Street Railway Journal* nous rappelle que le système série « a été utilisé pendant les cinquante dernières années dans le télégraphe électrique »<sup>2</sup>, et pendant les quinze années précédentes dans le système de lampes à arc. Le succès économique de ces deux applications électriques invitait à l'utiliser pour le transport de force motrice jusqu'aux tramways.

Pour Gabriel Tarde, « Le progrès est donc une espèce de méditation collective et sans cerveau propre, mais rendue possible par la solidarité (grâce à l'imitation) des cerveaux multiples d'inventeurs, de savants qui échangent leurs découvertes successives. »<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Madeleine Akrich, Michel Callon, Bruno Latour (1988), *ibid.*, p17.

<sup>2</sup> Sidney H. Short, « Why is Electricity not Used for Car Propulsion? », *Street Railway Journal*, 1888, p114 – 116.

<sup>3</sup> Gabriel Tarde (1895), *ibid.*, p161.

Pour Lewis Mumford, « L'invention n'est presque jamais l'œuvre unique d'un seul inventeur, quel que soit son génie. Elle est le produit des travaux successifs d'hommes innombrables, travaillant à des époques différentes et souvent avec des buts différents. Aussi est-ce simplement une figure de rhétorique d'attribuer une invention à une seule personne : c'est une erreur commode, entretenue par un faux patriotisme et par l'institution des brevets de monopoles qui permettent à un homme de revendiquer une récompense financière spéciale parce qu'il est le dernier chaînon d'un phénomène social compliqué qui a produit cette invention. Toute machine perfectionnée est un produit collectif composite ; la machine à tisser actuelle, d'après Hobson, est le composé d'environ soixante brevets. Cela est vrai aussi bien pour les pays que pour les générations. Le patrimoine commun de connaissances et d'habileté technique dépasse les limites des individus ou des nations. Oublier ce fait, ce n'est pas seulement introniser la superstition, mais miner la base essentiellement planétaire de la technologie. »<sup>1</sup>

A propos de l'invention de la machine à vapeur pendant la phase paléotechnique, il écrit :  
« Croire qu'une poignée d'inventeurs britanniques fit soudain chanter les roues, au XVIIIe siècle, est trop grossier pour être répété comme un conte de fée aux enfants. »<sup>2</sup>

De son côté, Madeleine Akrich cite William Ogburn qui reprit lui aussi l'exemple de l'invention de la machine à vapeur pour défendre l'idée selon laquelle le rôle de l'individu dans une invention est d'ordre statistique et non historique :

« (...) A moins de se situer sur des échelles de temps considérables, la psychologie, l'intelligence, les aptitudes individuelles sont, pour Ogburn, des variables statistiques mais non historiques. Ce qui l'amène à considérer qu'une phrase comme "les automobiles ont causé le développement des motels" est pleinement dotée de sens, alors qu'il dénie toute vertu explicative à un énoncé du type "Denis Papin a inventé la machine à vapeur". »<sup>3</sup>

De manière plus pragmatique, Joseph Schumpeter offrit la distinction suivante entre inventeur et innovateur :

---

<sup>1</sup> Lewis Mumford (1934), *ibid.*, p133.

<sup>2</sup> Lewis Mumford (1934), *ibid.*, p105.

<sup>3</sup> Madeleine Akrich, « Comment sortir de la dichotomie technique/société. Présentation des diverses sociologies de la technique » in Pierre Lemonnier et Bruno Latour (1994), *L'intelligence des techniques*, Paris : La Découverte, p119.

« La fonction d'inventeur ou de technicien en général, et celle de l'entrepreneur ne coïncident pas. L'entrepreneur peut être aussi un inventeur et réciproquement, mais en principe ce n'est vrai qu'accidentellement. L'entrepreneur, comme tel, n'est pas le créateur spirituel des nouvelles combinaisons ; l'inventeur comme tel n'est ni entrepreneur ni chef d'une autre espèce. Leurs actes et les qualités nécessaires pour les accomplir, diffèrent comme « conduite » et comme « type ». »<sup>1</sup>

Cette distinction nous permettrait de placer Lucien Gaulard et Nikola Tesla du côté des inventeurs, Marcel Deprez et Thomas Edison du côté des innovateurs.

## Conclusion

### *IX. Poursuite des recherches sur l'efficacité. Changement politique*

#### **1. Les « civilisés » et les « sauvages »<sup>2</sup> par André Leroi-Gourhan. Les milieux comme facteur d'évolution**

En introduction, nous avons décrit certains travaux de sociologie des sciences en mettant l'accent sur le rôle attribué à la matière. Pour conclure, nous reviendrons sur l'épistémologie de ces travaux, tentant d'en extraire une définition de l'efficacité.

Pour comprendre pourquoi certains groupes humains interagissent différemment des autres avec leur milieu extérieur, André Leroi-Gourhan s'intéressa à ce qui selon lui fait la différence entre eux, les techniques. Tous les hommes nus sont à peu près les mêmes. La seule couche qu'ils se rajoutent différemment selon leurs milieux, intérieur et extérieur, est la couche technologique<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Joseph Schumpeter (1911), *Théorie de l'évolution économique*, [http://classiques.uqac.ca/classiques/Schumpeter\\_joseph/theorie\\_evolution/theorie\\_evolution.html](http://classiques.uqac.ca/classiques/Schumpeter_joseph/theorie_evolution/theorie_evolution.html), Chapitres I à III, p86.

<sup>2</sup> André Leroi-Gourhan (1945), *ibid.*, p319.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p332.

### *a) Origines géographiques privilégiées*

André Leroi-Gourhan trouva que les origines géographiques des grandes technologies au début des temps historiques se trouvent sur un axe qui traverse l'Eurasie, en climat tempéré :

« Nous sommes parvenus à dégager qu'à partir du moment où les sociétés humaines prennent leur forme présente, c'est-à-dire aussi loin que remonte la documentation cohérente, il n'y a pas un centre "asiatique" de haute civilisation, mais un axe géographique qui s'allonge d'Europe occidentale en Asie orientale. Trois questions peuvent se poser : 1° Quelle position relative occupaient les groupes humains avant le IV<sup>e</sup> millénaire ? 2° Quel mécanisme aurait expulsé vers les confins géographiques les "attardés" ? 3° Quels sont les rapports de ces "attardés" avec l'axe semi-industriel de l'Eurasie ? »<sup>1</sup>

Parmi les peuples qui ne font pas partie de cet axe, André Leroi-Gourhan place les Africains, les Américains du Sud et les Océaniens. Il décrit la différence entre ces deux groupes ainsi :

« La différence dans le rythme d'évolution entre les groupes géographiquement favorisés (pratiquement ceux de l'axe eurasiatique) et les groupes marginaux, au sol relativement ingrat, est sensible. Pour les premiers, l'état normal est l'instabilité technique, le déroulement rapide de moyens de plus en plus efficaces : s'il en est parmi eux qui tiennent directement de groupes préhistoriques, il y a peu de chances pour qu'ils en aient gardé de nombreux témoignages techniques. Pour les seconds, il faut admettre que leur évolution est ralentie, mais qu'ils ont beaucoup emprunté. S'il a existé dans la préhistoire des liens entre les groupes centraux et les groupes périphériques, il y a évidemment de solides raisons pour que ces derniers aient conservé une partie au moins des traits archaïques (...). »<sup>2</sup>

### *b) Valeur matérielle*

Pour André Leroi-Gourhan, « Les groupes sont, sans exception, d'autant plus importants que leurs moyens matériels sont plus étendus, de sorte qu'il existe une relation entre le Progrès technique et l'extension du groupe (...). »<sup>3</sup>

Les civilisations techniques ont pris naissance et se sont développées dans les zones à climat tempéré. Un choix d'installation hors de ces zones au climat favorable était inefficace car

---

<sup>1</sup> Ibid., p314.

<sup>2</sup> Ibid., p433.

<sup>3</sup> Ibid., p435.

l'agriculture et l'élevage des bêtes y étaient compliqués<sup>1</sup>. Or cette étape est nécessaire pour assurer la survie du groupe et parvenir à dégager du temps pour s'occuper autrement, dans la fabrication industrielle d'objets en particulier. André Leroi-Gourhan écrit :

« On peut voir des groupes solidement charpentés intellectuellement, moralement et socialement comme l'Inde, la Chine ou le Japon au XIXe siècle, mais d'un état technique défavorable, faire le grand effort de passer d'un coup à l'industrialisation. »<sup>2</sup>

Cet effort fut rendu possible grâce ou à cause de leur milieu intérieur<sup>3</sup>. André Leroi-Gourhan suppose en effet que pour qu'il y ait domination efficace de la matière, il faut des « intentions inventives »<sup>4</sup> et un « milieu interne favorable »<sup>5</sup>, c'est-à-dire une volonté d'inventer et une culture encline à la domination de la matière.

Avant que le milieu intérieur entre en jeu, l'objet fait partie du milieu extérieur du groupe en question et est donc inerte<sup>6</sup>. Le milieu intérieur d'un groupe joue ainsi un rôle central dans la circulation des objets techniques : « Ce qui est important dans l'emprunt, ce n'est pas l'objet qui entre dans un groupe technique nouveau, c'est le sort qui lui est fait par le milieu intérieur. »<sup>7</sup> L'emprunt est un « acte d'assimilation »<sup>8</sup>, ce n'est pas juste un objet qui est apporté de l'extérieur à un groupe technique : « Il y a donc dans la diffusion des objets toute autre chose que leur progression sur le terrain géographique et le simple fait que toutes les techniques praticables sous tous les climats n'existent pas encore partout démontre que l'emprunt n'est pas une simple question de présence d'un objet empruntable dans la zone d'action de n'importe quel groupe ethnique. »<sup>9</sup>

Aussi, « (...) l'emprunt est non pas la dénaturation de l'emprunteur au profit du prêteur, mais un moyen nouveau qui concourt à la personnalisation ethnique (...). »<sup>10</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid., p311-312.

<sup>2</sup> Ibid., p374.

<sup>3</sup> Ibid., p374.

<sup>4</sup> Ibid., p398.

<sup>5</sup> Ibid., p398.

<sup>6</sup> Ibid., p371.

<sup>7</sup> Ibid., p356-357.

<sup>8</sup> Ibid., p371.

<sup>9</sup> Ibid., p372-373.

<sup>10</sup> Ibid., p392-393.

Enfin, l'emprunt permet au groupe emprunteur de progresser plus vite que s'il inventait seulement<sup>1</sup>.

Quand l'emprunt ne prend pas, il y a trois explications possibles :

« 1° parce que le groupe ethnique est en état d'*infériorité technique*, il ne peut se livrer aux associations indispensables; 2° parce que le groupe ethnique est en état d'*inertie technique*, il n'éprouve pas le besoin d'un effort d'assimilation; 3° parce que le groupe ethnique est en état de *plénitude technique*, il n'a que faire des éléments qu'on lui propose. »<sup>2</sup>

### c) Méthode

André Leroi-Gourhan dressa un tableau dans lequel pour chaque groupe ethnique, un chiffre représente un « trait technique ». Des exemples de trait technique : agriculture, élevage, métaux. Si le trait technique a été acquis en l'empruntant à un autre groupe, il ne compte pas. André Leroi-Gourhan commente son tableau ainsi :

« Il ne faut pas conclure de ce tableau que les Eskimo ou les Aïnoues soient privés d'outillage ou d'objets ; dans la moyenne, un Aïnou possède plus de mobilier qu'un paysan chinois et leurs moyens techniques personnels sont à peu près équivalents ; mais, par rapport à la Chine, témoin du meilleur état technique d'ensemble, les groupes à 3, 4 ou 9 points sont inférieurs, primitifs, sauvages. Cela ne préjuge pas non plus de leur équilibre général ; avec le même nombre de points les Aïnoues et les Tchouktchi ont des formes sociales, religieuses, économiques et techniques très différentes et les Barbares, qui totalisent 19 points comme les Japonais et les Chinois, n'ont évidemment pas la même envergure historique (1). »<sup>3</sup>

Ici les Barbares sont des groupes de personnes qui ont côtoyé les Chinois au Sud et à l'Est de la Chine<sup>4</sup> (p324). Dans la Note (1) de l'extrait ci-dessus, André Leroi-Gourhan souligne l'importance des mots et l'excuse du temps lorsqu'il écrit :

« Ces pages écrites il y a près de 30 ans n'ont plus qu'un intérêt méthodologique. Le vocabulaire est à interpréter mais je préfère le laisser tel car si l'on tient compte du fait que "barbares", "sauvages" etc.,

---

<sup>1</sup> Ibid., p400.

<sup>2</sup> Ibid., p375.

<sup>3</sup> Ibid., p327.

<sup>4</sup> Ibid., p324.

ont une valeur strictement techno-économique (comme “rustiques” ou “semi-industriels”) il répond à ce que j’ai tenté de dégager, à savoir la dépendance étroite du champ géographique et du champ historique dans la constitution du milieu technique et l’interdépendance des groupes de niveau technique différent dans un système économique en évolution. »<sup>1</sup>

André Leroi-Gourhan de conclure sa classification ainsi :

« Une première constatation répond à la question soulevée au début de ces chapitres : “Y a-t-il trois états : les civilisés, leurs barbares et les purs sauvages ?” Il semble qu’une réponse affirmative s’impose. »<sup>2</sup>

#### *d) Politique*

S’interrogeant sur le rôle de la technique dans la hiérarchisation des groupes ethniques, André Leroi-Gourhan admet que ses résultats sont incomplets car depuis la nuit des temps des groupes variés coexistent sur Terre<sup>3</sup>. Serait-ce que la suprématie technique n’est pas suffisante pour s’imposer face aux autres groupes ? André Leroi-Gourhan fait notamment référence à la dimension politique :

« Les Barbares sont dans une position particulière : ils sont comprimés par la masse chinoise dès le début et les conditions politiques leur interdisent un développement efficace mais ils subsistent jusqu’au bout sans perdre, qualitativement sinon quantitativement, leur état. »<sup>4</sup>

Faut-il pour autant étudier l’énorme quantité d’énergie politique, qu’il reconnaît lui-même avoir été déployée, pour comprendre l’humanité ? Il semble que la réponse soit négative, il faut continuer à s’intéresser à la technologie et à la biologie :

« La Biologie traverse sa crise de puberté et la Technologie est à peine vagissante, mais il est à prévoir que dans l’avenir la proximité des deux disciplines s’accusera de plus en plus clairement et que, par confrontation des deux séries de créations de la Nature et de créations de l’Industrie humaine, on parviendra à une perception plus profonde des phénomènes généraux de l’Evolution. »<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup> Ibid., p327.

<sup>2</sup> Ibid., p331.

<sup>3</sup> Ibid., p435.

<sup>4</sup> Ibid., p330.

<sup>5</sup> Ibid., p440.

### e) Conclusion

André Leroi-Gourhan conclut son travail ainsi : « De cette double notion d'extension progressive du groupe et d'extension des techniques est issue l'idée de la diffusion progressive des caractéristiques ethniques, point de vue qu'autorisent par ailleurs l'anthropologie, l'histoire des religions et l'histoire de l'art. »<sup>1</sup>

L'objectif est sans doute d'établir une hiérarchie des groupes ethniques. En prenant le critère matériel que constituent les objets techniques, force est de constater qu'aujourd'hui le milieu intérieur occidental domine.

## 2. Politique des sociologues de l'innovation. La matière et nous

Il y a diverses manières d'interroger l'efficacité. Partir de la matière permet d'apporter des réponses intéressantes. Dans notre thèse, nous nous sommes intéressés au rendement des tout premiers moteurs électriques, qui dépendait des conditions techniques de production et de transport de l'énergie électrique. Nous avons également abordé la question des matériaux qui constituent les moteurs eux-mêmes, le cuivre et les aimants notamment.

Néanmoins, nul besoin de se lancer dans ce travail sur l'origine des matériaux lorsque l'on lit Lewis Mumford, qui commence son ouvrage *Le mythe de la machine* avec une référence à la théorie qui consiste à élaborer une théorie civilisationnelle à partir des artefacts :

« La trompeuse notion que l'homme est primitivement un animal créateur d'outils, qui doit son extraordinaire développement mental en grande partie à son long apprentissage de la fabrication d'outils et d'armes, ne sera point facile à effacer. Pareille à d'autres prétentions plausibles, elle échappe à la critique rationnelle, surtout parce que cette notion flatte la vanité de l'« Homme technologique » moderne, ce fantôme habillé de fer. »<sup>2</sup>, puis discrédite ce courant de pensée avec humour : « Les artefacts peuvent bien défier le temps avec opiniâtreté, ce qu'ils racontent sur l'histoire humaine est beaucoup moins que la vérité, toute la vérité, rien que la vérité. Si la seule clé des réalisations de Shakespeare en tant que dramaturge était son berceau, une chope élisabéthaine, sa mâchoire inférieure, et quelques planches pourries provenant du théâtre du Globe, on ne pourrait

---

<sup>1</sup> Ibid., p435.

<sup>2</sup> Lewis Mumford (1967), *Le mythe de la machine*, Fayard, Traduction en 1973, p28.

imaginer, fût-ce obscurément, le sujet de ses pièces, encore moins deviner dans ses moments les plus fous quel poète il était. »<sup>1</sup>

En étudiant les techniques, les sociologues de l'innovation s'intéressent eux aussi aux cultures matérielles<sup>2</sup>, aux causes de leur inertie ou de leur stabilité<sup>3</sup>. Cherchant à dépasser ce que leurs prédécesseurs ont fait, ils se méfient de l'évolutionnisme, trop souvent associé au progressisme et à l'évolutionnisme téléologique<sup>4</sup>.

Madeleine Akrich résume ainsi le rôle qu'André Leroi-Gourhan donne à la technique : « (...) Pour Leroi-Gourhan, la technique doit être considérée dans la continuité par rapport à l'évolution naturelle, évolution qu'elle vient prolonger sous une forme extra-corporelle (...). »<sup>5</sup>

Dans l'introduction de l'ouvrage *L'intelligence des techniques* de Bruno Latour et Pierre Lemonnier, les deux auteurs précisent : « Ni les variations de l'environnement "naturel", ni les exigences de la reproduction sociale, ni celles du corps propre, ni les élaborations de la psychologie, ne suffisent à expliquer l'évolution. »<sup>6</sup>

Ils donnent une nouvelle définition de la technique, bien que similaire à celle donnée par Marcel Mauss dans « Techniques du corps » : les techniques ne sont pas seulement dans les outils, mais aussi dans les gestes, donc par extension dans « l'action efficace sur la matière » et dans « l'identité ethnique et sociale »<sup>7</sup>.

L'objectif de leur ouvrage est le suivant : « En rassemblant ces spécialistes, nous espérons traquer tous les préjugés à la fois – sur le passé et le présent, le primitif, l'animal, l'enfant, l'artisan et l'ingénieur – et permettre ainsi de saisir à nouveau le phénomène technique. »<sup>8</sup>

---

<sup>1</sup> Lewis Mumford (1967), *ibid.*, p30.

<sup>2</sup> Pierre Lemonnier et Bruno Latour (1994), *ibid.*, p16.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p23.

<sup>4</sup> *Ibid.*, p23.

<sup>5</sup> Madeleine Akrich, « Comment sortir de la dichotomie technique/société. Présentation des diverses sociologies de la technique » in Pierre Lemonnier et Bruno Latour (1994), *L'intelligence des techniques*, Paris : La Découverte, p112.

<sup>6</sup> *Ibid.*, p23.

<sup>7</sup> *Ibid.*, p11.

<sup>8</sup> *Ibid.*, p12.

a) *Techniques et efficacité. Le Leviathan et la pompe à air par Bruno Latour*

Selon Bruno Latour, dans la définition de la technique, la notion d'efficacité aveugle. Une vue erronée de la technique serait que l'efficacité est la correspondance entre la forme et la fonction. C'est comme si, pour parvenir à l'efficacité, il n'y avait pas de transformation. Cette vue n'est pas assez généreuse et empêche la technique d'être. Les techniques ne se définissent pas uniquement par leur efficacité. Que cachent-elles d'autre ? Des pratiques, qui ne sont pas forcément efficaces, et qui contiennent en tout cas des choix de valeur, ainsi que des objets qualifiés d'hybrides. L'objectif des sociologues de l'innovation centrés autour de Bruno Latour est de dévoiler ces pratiques, c'est-à-dire le lien entre nature et culture. Il s'agit de faire travailler ensemble ethnologues et historiens ou sociologues des sciences sur un objet d'étude, la science et les scientifiques, tout en ayant soin de respecter le principe de symétrie dans l'étude des hybrides et des non-hybrides et dans l'explication donnée aux résultats scientifiques, qu'ils soient vrais ou faux. Jusqu'à présent, l'explication est fournie lorsque les résultats sont faux mais pas lorsqu'ils sont vrais. Avec de telles méthodes de travail, le scientifique devient lui-même d'emblée un objet d'étude ou hybride : « Hybrides nous-mêmes, installés de guingois à l'intérieur des institutions scientifiques, mi-ingénieurs, mi-philosophes, tiers instruits sans le chercher, nous avons fait le choix de décrire les imbroglios où qu'ils nous mènent. »<sup>1</sup>

Pour Bruno Latour, la modernité a amené les scientifiques à tracer une frontière artificielle entre des hybrides, de nature ou de culture, et des non-hybrides. Il caractérise leurs pratiques en deux étapes, la *traduction* et la *purification*. Les pratiques de traduction consistent pour les scientifiques à manipuler le réseau au sein duquel ils se trouvent, réseau pourtant intéressant puisqu'il met en relation soit plusieurs cultures, les hommes et femmes, êtres humains et animaux, êtres vivants et objets. Les pratiques de purification consistent à cacher cette première étape de manipulation et à ériger des barrières entre ceux qui étaient pourtant réunis. Le droit a son importance pour tenir en place ces deux pratiques puisqu'il définit à la fois les mélanges et les différences de valeur qui facilitent la manipulation.

---

<sup>1</sup> Bruno Latour (1991), *ibid.*, p10.

Les critiques de l'anthropologie symétrique voudraient faire la distinction entre faits, pouvoir et discours. L'outil de base des sociologues de la théorie de l'acteur-réseau étant le réseau, vouloir distinguer faits, pouvoir et discours c'est, pour ces critiques, vouloir casser le réseau qui lie ces trois éléments : « Et, en effet, si le réseau intermédiaire de quasi-objets n'est pas reconstitué, il devient aussi difficile de saisir la société que la vérité scientifique, et pour les mêmes raisons. Les intermédiaires que l'on a effacés tenaient tout, alors que les extrêmes une fois isolés ne sont plus rien. »<sup>1</sup>

Dans son essai *Nous n'avons jamais été modernes*, l'argumentation de Bruno Latour se base sur la lecture de l'ouvrage de Steven Shapin et Simon Schaffer, *Léviathan et la pompe à air, Hobbes et Boyle entre science et politique*, dans lequel les deux auteurs ont mis en parallèle la science politique de Thomas Hobbes et la science expérimentale de Robert Boyle pour décrire la modernité<sup>2</sup>. Steven Shapin et Simon Schaffer ont démontré que la modernité nécessitait un changement d'échelle pour exercer son pouvoir : on est passé d'une République à un laboratoire, espace privé, où les non humains font autorité, et où les témoins humains, en faible nombre, n'ont pas été élus par les citoyens. Les instruments scientifiques ont joué un rôle important dans cette révolution et ont participé au mouvement.

Hobbes définissait le Léviathan comme une société où les citoyens sont censés être représentés par un seul souverain. Boyle définissait le laboratoire comme un lieu où la nature est censée être représentée par le scientifique.

Hobbes était un partisan de la théorie de l'éther, l'éther étant alors considéré comme une sorte de substance qui remplissait l'espace, contrairement à Boyle qui démontra dans son laboratoire que le vide existait. Hobbes nia la démonstration expérimentale de Boyle car elle passait par un changement d'échelle, celle d'une République à celle d'un laboratoire.

---

<sup>1</sup> Ibid., p163-164.

<sup>2</sup> Steven Shapin et Simon Schaffer (1993), *Léviathan et la pompe à air, Hobbes et Boyle entre science et politique*, La Découverte.

Dans les termes de Bruno Latour, chez Hobbes, on représente les humains et chez Boyle les non humains. Les laboratoires deviennent des lieux privés où le souverain unique voulu par Hobbes n'a plus aucun pouvoir et où ni la Nature, ni Dieu, toutes deux des entités supérieures, ne peuvent y être invoquées pour contrer le pouvoir du souverain. Parlant de « double construction sociale et naturelle »<sup>1</sup>, il note qu'il est néanmoins compliqué de dire si c'est bien la Nature qui est représentée dans un laboratoire, ou bien si ce sont les hommes : « Science et politique ont chacune besoin de l'autre pour exister. Le tandem fonctionne ainsi : la science annonce qu'elle représente la nature qui est transcendante, en omettant d'annoncer qu'elle est aussi sociale. Le Leviathan annonce que les hommes par leur volonté seule peuvent s'organiser en société, en omettant d'annoncer qu'ils se reposent également sur des choses. »<sup>2</sup>

Pour Bruno Latour, Boyle était moderne car le pouvoir moderne passe par un changement d'échelle, via les pratiques de traduction et de purification. Son propos, repris à Steven Shapin et Simon Schaffer : « (...) nous vivons dans des sociétés qui ont pour lien social les objets fabriqués en laboratoire. »<sup>3</sup>

Plus loin : « Pourtant, le fil d'Ariane existe qui permettrait de passer continûment du local au global, de l'humain au non-humain. C'est celui du réseau de pratiques et d'instruments, de documents et de traductions. [...] Les deux extrêmes, le local et le global, sont beaucoup moins intéressants que les agencements intermédiaires nommés ici réseaux. »<sup>4</sup>

S'intéressant également aux liens entre économie et science, Bruno Latour considère que capitalisme et socialisme ont échoué à remettre en cause les pratiques de « traduction » et de « purification » des scientifiques. L'exploitation de la nature et des êtres humains sont là, d'où le besoin d'écologie et de [*Insérer le nom d'un parti politique luttant contre l'exploitation de tous les êtres humains*]. C'est ce double échec qui fait mal à ceux que Bruno Latour appelle les modernes.

---

<sup>1</sup> Bruno Latour (1991), *ibid.*, p50.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p50.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p35.

<sup>4</sup> *Ibid.*, p165-166.

Selon lui, les modernes ne doutent pas de l'émancipation par les sciences. Ils ont créé des non humains, qui n'ont pas d'âme mais qui ont un sens et qui peuvent être plus fiables que les humains dotés d'une volonté, et c'est cet aspect des choses qui distinguerait la culture occidentale des autres :

« Ces nouveaux non-humains [la pompe à air de Boyle, les microbes de Pasteur, la poulie composée d'Archimède] possèdent des propriétés miraculeuses puisqu'ils sont à la fois sociaux et asociaux, producteurs de natures et constructeurs de sujets. Ce sont les *tricksters* de l'anthropologie comparée. Par cette brèche, les sciences et les techniques vont faire irruption de façon si mystérieuse dans la société que ce miracle va forcer les Occidentaux à se prendre pour tout à fait différents des autres. Le premier miracle en engendre un deuxième – pourquoi les autres n'en font-ils pas autant ? –, puis un troisième – pourquoi sommes-nous tellement exceptionnels ? C'est ce trait qui va engendrer, par cascade, toutes les petites différences, lesquelles vont se trouver recueillies, résumées et amplifiées par le grand récit de l'Occidental radicalement à part de toutes les cultures. »<sup>1</sup>

A côté se trouvent deux autres groupes, les postmodernes et les antimodernes, tous deux liés par la peur. Quand les uns, les modernes, veulent sauver l'intelligence du monde moderne par peur de l'avoir perdue après avoir été mis en contact avec des hybrides, les autres, les postmodernes et les antimodernes, lui retirent cette intelligence dès le départ. Les antimodernes s'accordent sur le fait qu'il y a bien une catégorie « modernes » mais s'en distinguent ainsi : « Toujours sur la défensive, ils crurent constamment ce que les modernes disaient d'eux-mêmes pour en inverser violemment le signe. Antirévolutionnaires, ils se firent du temps passé comme de la tradition la même idée ridicule que les modernes »<sup>2</sup>. Quant aux postmodernes, Bruno Latour va jusqu'à les qualifier de pervers : « Au signe près, modernes et antimodernes partagent l'intégralité de leurs convictions. Les postmodernes, toujours pervers, acceptent l'idée qu'il s'agit bien d'une catastrophe mais affirment qu'il faut s'en réjouir au lieu de s'en lamenter ! »<sup>3</sup>

Bruno Latour se situe à côté de tout ce monde et considère que tous ont tort, que personne n'a rien perdu du tout. Son échappée est la suivante : le projet des Lumières n'a pas encore

---

<sup>1</sup> Ibid., p152.

<sup>2</sup> Ibid., p184.

<sup>3</sup> Ibid., p168.

abouti, nous n'avons jamais été modernes. Il pose donc la question suivante : « comment vouloir les Lumières sans la modernité ? »<sup>1</sup>

### *b) Théorie apolitique des sociologues de l'innovation, par Langdon Winner*

Dans un article de 1993, Langdon Winner s'intéresse aux historiens et sociologues appartenant à l'école de pensée la plus à la mode à cette époque, les sociologues de l'innovation, ou sociologues constructivistes<sup>2</sup>. Il résume leur méthode ainsi: "the empirical programme of relativism"<sup>3</sup>.

Après leur avoir reconnu quelques qualités, telles que fournir des études de cas aux étudiants peu imaginatifs<sup>4</sup>, mettre l'accent sur la contingence plutôt que la nécessité au moment du choix technique<sup>5</sup> et atténuer la distinction entre société et technique<sup>6</sup>, Langdon Winner passent en revue tous les points sur lesquels ils n'ont selon lui pas assez développés.

Concernant leur programme empathique d'abord, Langdon Winner les met en garde: "They must pay attention to the variety of interpretations of what a particular technological entity in a process of development means and how different people act in different ways to achieve their purposes within that process."<sup>7</sup>

A ce propos, Langdon Winner se pose la question suivante : jusqu'où faut-il aller dans l'acquisition de connaissances pour parler de technologies ? Faut-il aller jusqu'à vivre sur un pétrolier, comme Noel Mostert l'a fait pour écrire son livre *Supership* (Langdon Winner parle de "wonderful book"<sup>8</sup>), pour pouvoir philosopher sur les pétroliers ?

---

<sup>1</sup> Ibid., p22.

<sup>2</sup> Langdon Winner, "Upon opening the blackbox and finding it empty: social constructivism and the philosophy of technology", *Science, Technology and Human Values*, Volume 18, N°3 (Summer, 1993), pp362-378, p364.

<sup>3</sup> Ibid., p365.

<sup>4</sup> Ibid., p366.

<sup>5</sup> Ibid., p367.

<sup>6</sup> Ibid., p367.

<sup>7</sup> Ibid., p366.

<sup>8</sup> Ibid., p363.

Il poursuit sa critique en condamnant l'étroitesse du programme des sociologues constructivistes<sup>1</sup>. Dans sa critique, il mobilise l'argument psychologique et estime que s'ils sont si condescendants vis-à-vis de leurs prédécesseurs (Lewis Mumford, Jacques Ellul, Ivan Illich, Ecole de Francfort, Heidegger, Marx, Engels), c'est parce qu'ils souffrent sans doute d'un complexe d'Oedipe<sup>2</sup>. Il leur reproche également leur élitisme: "Although this approach rejects the "great man theory" of technological development, it still attends to the needs and problems of the powerful persons and groups: those with the resources to enter the game and define its terms."<sup>3</sup> Au-delà de ça, sa critique porte sur plusieurs aspects de leur théorie.

Il leur reproche de ne pas prendre en compte de catégories autres que celles de société et technique. Dans « société », il y a pourtant des relations de classes qui définissent les institutions économiques, politiques ou technologiques ; il y a aussi la relation avec la nature<sup>4</sup>.

Enfin, Langdon Winner reproche aux sociologues constructivistes de laisser les effets des technologies de côté, sans doute selon lui parce que ces effets ont été déjà énormément étudiés<sup>5</sup>. Ils ne feraient qu'une sociologie des technologies, où la manière dont ces technologies transforment les relations sociales et le rapport à soi n'est pas étudié<sup>6</sup>. S'ils ne critiquent pas assez les technologies, ce serait pour préserver la pureté de leur méthode<sup>7</sup>. Qu'en est-il de la qualité de vie au milieu des technologies ? Le chemin pris par les sociétés technologiques n'est pas étudié<sup>8</sup>.

Selon lui, il est important de nommer les choses et d'indiquer comment une personne évalue leurs propriétés<sup>9</sup>.

---

<sup>1</sup> Ibid., p368.

<sup>2</sup> Ibid., p367.

<sup>3</sup> Ibid., p370.

<sup>4</sup> Ibid., p371.

<sup>5</sup> Ibid., p368.

<sup>6</sup> Ibid., p369.

<sup>7</sup> Ibid., p371-372.

<sup>8</sup> Ibid., p373.

<sup>9</sup> Ibid., p372.

Langdon Winner prend l'exemple de l'une de ses études dans laquelle il trouva que si Robert Moses, planificateur de la ville de New York, a décidé de construire un pont assez bas, c'était pour empêcher les bus (qui contiennent des pauvres) de l'utiliser, et donc de préserver Long Island de leur présence. Steven Woolgar (1991) a remis en question l'analyse de Robert Moses.

En résumé, ce que Langdon Winner reproche aux sociologues constructivistes, c'est leur neutralité politique<sup>1</sup> : "Interpretive flexibility soon becomes moral and political indifference."<sup>2</sup>

Il conclut ainsi:

"(...) The corresponding inquiries of traditional Marxists have always shown a concern for the condition of the working class and the world's downtrodden, expressing suspicion of the manipulations of capital and a hope that the dynamics of history would produce human liberation.

With liberal theorists, similarly, there is a fundamental conviction that expanding technology and economic growth will eventually make everyone relatively wealthy.

With Heideggerians, one always has the sense that there might someday be a "turning" within the history of being to save humanity from the perils of modernity.

With Mumford, there is always an underlying hope that the abstract, mechanistic obsessions of the modern age would be replaced by a more humane, organic sense of technical possibilities.

With Ellul, there remains the possibility that, even as the technological system reaches its maturity, humanity will renew its covenant with a forgiving God.

What are the corresponding prospects envisioned by social constructivism? The answer is by no means clear. To this point, the dreams and projects of social constructivists have been primarily academic ones, carefully sanitized of any critical standpoint that might contribute to substantive debates about the political and environmental dimensions of technological choice."<sup>3</sup>

### *c) Comprendre le concept d'hybride*

Pour tenter de comprendre cette critique portée par Langdon Winner aux sociologues constructivistes, tentons d'abord de comprendre la notion d'hybride, utilisée par Bruno Latour.

---

<sup>1</sup> Ibid., p374.

<sup>2</sup> Ibid., p372.

<sup>3</sup> Ibid., p375.

Pour ce dernier, les hybrides, créés par les modernes, sont « obstinés et incompréhensibles ». Il faut donc les qualifier non plus d'objets mais de sujets. Ainsi ce que Bruno Latour ne comprend pas, il souhaite le rendre sujet. Cette découverte fonctionne pour tout ce qui a toujours été considéré comme non humain. L'une des dimensions du programme des sociologues de l'innovation est de rendre compréhensibles les hybrides, en s'intéressant aux scientifiques qui les ont rendu tels et qui les ont instaurés :

« Des actions élémentaires telles que "l'ingénieur occidental" peut les concevoir, il est possible de passer, par transpositions et traductions successives, à l'ethnophysique, à l'ethnotechnologie, c'est-à-dire aux sciences indigènes, mais à condition de comprendre que la physique et la technologie sont nos sciences indigènes à nous et qu'elles mériteraient, elles aussi, le radical, à la fois respectueux et condescendant, d' "ethno". »<sup>1</sup>

Parler d'hybrides de nature ou de culture, c'est supposer que les non-hybrides existent. Bruno Latour semble supposer que les hybrides sont nouveaux et qu'il y aurait eu une époque où ils n'existaient pas. Si l'on s'intéresse aux hybrides de culture, qui sont-ils exactement et qui sont les non-hybrides ? Si l'on analyse champ lexical qu'utilise Bruno Latour pour décrire les hybrides dans son ouvrage *Nous n'avons jamais été modernes*, ces derniers semblent être les Européens pré-révolution industrielle, ou pré-modernité.

Pour Bruno Latour, ignorer les invisibles, qu'ils soient objets ou sujets, ces « conséquences inattendues », est impoli. Son texte écrit en 1974 et intitulé « Les idéologies de la compétence en milieu industriel à Abidjan » donne sans doute des éléments de compréhension de sa position théorique ultérieure et de cette notion de « non modernité ». Son propos y est de critiquer le libéralisme économique et son encadrement juridique par l'Etat. L'efficacité et le rôle qu'elle est censée jouer selon Bruno Latour n'y sont pas toujours clairement définis. Or elle semble à elle seule être la solution à tous les problèmes de racisme, du moins dans un contexte industriel. Son propos serait que nous avons tous une efficacité dormante en nous. Dans le cas des diplômés Ivoiriens, c'est-à-dire de la main d'œuvre sortie des écoles, c'est en partie l'institution qui la bride car l'institution est inefficace, ainsi que l'entreprise, car elle

---

<sup>1</sup> Pierre Lemonnier et Bruno Latour (1994), *ibid.*, p14.

l'est aussi. Si ces deux institutions étaient organisées efficacement, il n'y aurait plus tous ces obstacles entre les Ivoiriens et leur efficacité innée d'êtres humains.

Dans son texte, Bruno Latour identifie les moyens de l'efficacité comme étant la compétence, qui s'obtient par la formation et par le réseau. Il critique le libéralisme économique et semble dire : vous vous dites efficace mais vous avez oublié l'équité dans votre traitement des êtres humains (et accessoirement des objets), vous n'êtes donc pas si efficace que ça. Aujourd'hui, alors que les hybrides ont proliféré et sont partout, ça n'a plus de sens d'omettre ce paramètre. Il faut donc dessiner un nouveau cadre, toujours centré sur l'efficacité, mais qui n'a plus besoin d'ignorer certaines cultures, techniques ou autres. Les institutions y incarneraient l'efficacité, l'objectivité scientifique et rationnelle, prendraient appui sur l'Etat, et permettraient ainsi de créer une communauté où chaque humain se recentre sur son efficacité, qui reste à définir, qu'il va pacifiquement confronter à celle de l'Autre.

Dans son débat avec Pierre Lemonnier, Bruno Latour lui recommande, pour atteindre cette Efficacité, d'inclure un peu d'éthique dans le calcul et de prendre en compte les déchets matériels ainsi que les hybrides, même si cela ne se fera pas sans quelques difficultés politiques :

« Tant que nous nous pensons comme modernes, nous sommes incapables de comprendre à la fois les autres et nous-mêmes. Nous devons en effet analyser des cultures, tu le sais beaucoup mieux que moi, qui ne considèrent justement pas les non-humains comme des corps étrangers à leur collectif. Et nous devrions les analyser en supposant que dans nos sociétés, les avions, les médicaments, les métros et les électrons échapperaient justement de façon absolue – du moins au début de l'analyse – au monde social, avant d'être conciliés avec lui par une synthèse. Aucune comparaison n'est plus possible entre eux et nous et l'ethnologie comparée se vide de toute pertinence ! En effet, nous sommes obligés soit de croire que nous séparons chez nous le style et la fonction, soit de croire qu'ils les confondent, soit de leur imposer une séparation qui n'a lieu en pratique ni chez nous ni chez eux, soit, enfin, de supposer une confusion des deux qui n'a cours ni chez eux, ni chez nous...

(...) Je ne dis pas que nous n'y perdons rien, je suis conscient des risques, en particulier politiques. Mais je prétends qu'on y gagne au moins la possibilité de comparer sur une base saine –

j'allais dire fraternelle – des collectifs auparavant incomparables. C'est là l'enjeu véritable de notre travail, et non la question de l'efficacité qui, j'allais dire, va de soi. »<sup>1</sup>

Est-ce pour pouvoir ainsi continuer à avancer vers la rationalisation du monde sans plus de tracas que Bruno Latour a écrit son essai « Nous n'avons jamais été modernes » ? Et obtenir ainsi les Lumières sans la Modernité. Cet essai correspondrait alors à une remise en cause seulement partielle de la voie suivie par les modernes, qui n'ont pas encore été au bout. L'ingénieur n'est toujours pas aussi efficace que son calcul, mais bientôt peut-être le deviendra-t-il :

« De même que les modernes n'ont pu qu'exagérer l'universalité de leurs sciences – en arrachant le fin réseau de pratiques, d'instruments et d'institutions qui pavait le chemin menant des contingences aux nécessités –, ils n'ont pu, symétriquement, qu'exagérer la taille et la dureté de leurs sociétés. (...) Ils se sont encensés pour des vertus qu'ils sont incapables de posséder – la rationalisation –, mais ils se sont également flagellés pour des péchés qu'ils sont incapables de commettre – cette même rationalisation !

S'ils ont pu se tromper ainsi, c'est parce qu'ils ont omis d'intégrer les quasi-objets dans leur réseau. Ils ont donc cru qu'il y avait des différences de niveau entre « des personnes, des pensées, des situations locales et des organisations, des lois, des règles globales ». »<sup>2</sup>

Le projet de Bruno Latour est finalement le suivant : « Maintenir tous les avantages du dualisme des modernes sans ses inconvénients – la clandestinité des quasi-objets ; conserver tous les avantages du monisme des prémodernes sans en souffrir les limites –, la restriction de taille par la confusion durable des savoirs et des pouvoirs. »<sup>3</sup>

Son projet serait alors difficilement contestable car on aurait la rationalité et la moralité, en un mot l'efficacité :

« Pour nous, les techniques ne sont pas neuves, elles ne sont pas modernes au sens banal du mot, mais elles composent depuis toujours notre monde. Plus que les précédentes, notre génération les a digérées, intégrées, humanisées peut-être. Parce que nous sommes les premiers qui ne croyons plus ni

---

<sup>1</sup> Bruno Latour, « Lettre à mon ami Pierre sur l'anthropologie symétrique », *Ethnologie française*, T. 26, No. 1, « Culture matérielle et modernité » (Janvier-Mars 1996), pp. 17-31, Presses Universitaires de France, p35.

<sup>2</sup> Bruno Latour (1991), *ibid.*, p163.

<sup>3</sup> Bruno Latour (1991), *ibid.*, p183.

aux vertus ni aux dangers des sciences et des techniques, mais qui partageons leurs vices et leurs vertus sans y voir le ciel ou l'enfer, il nous est peut-être plus facile de leur rechercher des causes sans faire appel au fardeau de l'homme blanc, à la fatalité du capitalisme, au destin européen, à l'histoire de l'Être, ou à l'universelle rationalité. Peut-être est-il plus facile aujourd'hui d'abandonner la croyance en notre propre étrangeté. Nous ne sommes pas exotiques mais ordinaires. Par conséquent les autres non plus ne sont pas exotiques. Ils sont comme nous, ils n'ont jamais cessé d'être nos frères. N'ajoutons pas le crime de nous croire radicalement différents à tous ceux que nous avons déjà commis. »<sup>1</sup>

#### *d) Bruno Latour à la lumière de la théorie d'Auguste Comte*

Toujours dans le souci de mieux comprendre la théorie proposée par Bruno Latou, nous allons tenter ici de la positionner sur l'échelle des modes d'explication de l'origine des phénomènes proposée par Auguste Comte.

##### *1. Les trois modes de pensée*

Dans sa loi des trois états, Auguste Comte releva trois modes de pensée servant à décrire les connaissances humaines, les modes théologique, métaphysique et positif. Les modes de pensée théologique et métaphysique sont tous les deux antérieurs au mode de pensée positif et ne permettent plus de fournir une explication sur l'origine des phénomènes. Auguste Comte ne fut pas le premier à trouver des limites aux modes de pensée théologique et métaphysique. John Stuart Mill rappelle qu'Auguste Comte considérait que Galilée, Bacon et Descartes étaient les fondateurs de la philosophie positive. Il rappelle aussi qu'« il était difficile de mener la guerre contre tous deux [modes de pensée théologique et métaphysique] plus vigoureusement que n'avait fait Hobbes, au commencement du XVIIe siècle. »<sup>2</sup>

D'après cette chronologie, dans un premier temps, on tenta de rattacher tous les phénomènes observés à une seule volonté. « Mais cette volonté unique ne pouvait être la volonté des objets eux-mêmes puisqu'ils étaient plusieurs : il fallait que ce fût la volonté d'un être invisible, séparé des objets

---

<sup>1</sup> Bruno Latour (1991), *ibid.*, p173.

<sup>2</sup> John Stuart Mill (1893, 5<sup>ème</sup> édition), *Auguste Comte et le positivisme*, Paris : F. Lacan, p12.

par une distance inconnue, et les gouvernant de loin »<sup>1</sup>. Chaque catégorie d'objets avait donc son propre Dieu, ce qui correspond au Polythéisme. Dans ce mode de pensée théologique c'est-à-dire, pour Auguste Comte ou John Stuart Mill, « dans l'état d'enfance de la raison et de l'expérience, les objets sont individuellement considérés comme animés »<sup>2</sup>.

Dans le mode de pensée métaphysique, chaque objet, plante ou animal possède respectivement une « âme végétative », une « force plastique » ou un « principe vital » : « Les objets dès lors se conduisent comme ils font parce que c'est leur Essence d'agir ainsi, ou bien en raison d'une vertu inhérente. On rend compte des phénomènes par les tendances et les penchants supposés de l'abstraction *Nature* qui, bien que regardée comme impersonnelle, est représentée comme agissant d'après une sorte de motifs, et d'une manière plus ou moins analogue à celle des êtres conscients. »<sup>3</sup>

Ensuite on donna une essence à ces objets, considérée comme un intermédiaire entre la Volonté et l'objet lui-même, une sorte d'éther ou aujourd'hui de matière noire. Peu à peu, l'essence devint réelle et efficace et la nécessité de passer par un être volontaire pour expliquer les phénomènes s'estompa. L'observation de lois invariables fit basculer dans le mode de pensée positif, et avec lui dans le monothéisme. Auguste Comte, et avec lui tous les penseurs positifs dont il a synthétisé l'état d'esprit, proposait d'expliquer la cause des phénomènes par des lois basées sur l'enchaînement de certains faits qui permettent d'aboutir au phénomène à expliquer : « toutes les théories qui ont fait du bonheur du genre humain la loi ultime des institutions ainsi que des règles d'action, et qui ont pris pour guides l'observation et l'expérience (et il y en a eu de cette nature à toutes les époques de libre spéculation) ont droit au nom de Positives. Mais elles n'ont formé qu'une petite minorité. »<sup>4</sup>

## 2. Critique du positivisme

Une critique du positivisme par rapport au mode de pensée théologique est que lorsque l'on remplace le mode de pensée théologique par le mode de pensée positiviste, la Nature n'est alors plus dotée d'aucune intelligence, ce qui pose des problèmes quand il s'agit d'expliquer

---

<sup>1</sup> Ibid., p20.

<sup>2</sup> Ibid., p11.

<sup>3</sup> Ibid., p11-12.

<sup>4</sup> Ibid., p69.

l'origine du monde. John Stuart Mill reprochait à la théorie positiviste d'Auguste Comte d'être trop fermée à ce niveau-là<sup>1</sup>.

Il y eut également des critiques émanant de partisans du mode de pensée métaphysique, ce à quoi, selon John Stuart Mill, Auguste Comte répondait ceci : « En répudiant la métaphysique, M. Comte ne s'est interdit d'analyser ou de critiquer aucune des conceptions abstraites de l'esprit. (...) Ce qu'il condamnait, c'était la coutume de concevoir ces abstractions mentales comme des entités réelles susceptibles de déployer une force ainsi que de produire des phénomènes, et dont l'énonciation pût être regardée comme une théorie ou comme une explication des faits. »<sup>2</sup>

Prendre les mots pour des choses, voilà une des erreurs des métaphysiciens selon John Stuart Mill, qui citait la querelle entre le Nominalisme et le Réalisme, « controverse qui représente un des points capitaux de l'histoire de la pensée ; car c'est la première lutte de celle-ci pour s'affranchir de l'empire des abstractions verbales »<sup>3</sup>. Dans le nominalisme, les mots qui désignent les choses sont des instruments qui permettent de penser, dans le réalisme ils sont réels tout autant que les choses. Le mode de pensée métaphysique rejoint le réalisme, et le positivisme le nominalisme.

Bien que critique du positivisme, John Stuart Mill admettait que le positivisme était plus évolué que la métaphysique : « (...) c'est un des points embarrassants de la philosophie que d'expliquer comment le genre humain, après avoir imaginé une simple suite de noms pour conserver les rapports de certaines combinaisons d'idées ou d'images, a pu oublier sa propre opération au point d'investir d'une réalité objective ces créations de sa volonté, et de prendre le nom d'un phénomène pour sa cause efficiente. »<sup>4</sup> Il pensait néanmoins que cet embarras pouvait s'atténuer si l'on se rappelait que le mode de pensée métaphysique était quand même une évolution du stade théologique.

---

<sup>1</sup> Ibid., p15.

<sup>2</sup> Ibid., p16.

<sup>3</sup> Ibid., p17.

<sup>4</sup> Ibid., p18.

### 3. La métaphysique de Bruno Latour

Si l'on accepte l'échelle chronologique d'Auguste Comte, la notion de « quasi-objets » de Bruno Latour serait-elle une tentative de retour à un mode de pensée métaphysique ?

Evoquant le mode de pensée métaphysique, John Stuart Mill écrit : « Le degré suivant est la conception d'êtres invisibles dont chacun surveille et gouverne une classe entière d'objets ou d'évènements. »<sup>1</sup> Si l'on poursuit l'analogie, les êtres invisibles qui gouvernent les objets seraient dans la théorie de Bruno Latour les scientifiques.

Ou alors, peut-être que ce que propose Bruno Latour n'est pas un retour en arrière mais bien une marche en avant :

« (...) L'état complètement positif d'une des sciences précoces a souvent coïncidé avec l'état métaphysique de celle qui la suit et avec l'état purement théologique de celles qui sont placées plus haut dans la série. »<sup>2</sup>

Par exemple, Newton « ferma l'ère métaphysique de la science astronomique »<sup>3</sup>, Lavoisier ouvrit la phase positive de la chimie et Bichat celle de la biologie. La théorie de Bruno Latour n'en serait qu'au stade métaphysique et serait sur le chemin de l'état positif.

## 3. Les matières premières de l'Afrique

### a) Critique de l'anthropologie symétrique. Causalité vs. Intentionnalité

Dans sa critique de l'anthropologie symétrique, François Sigaud fit lui appel à l'opposition philosophique entre causalité et intentionnalité. Selon lui, pour qu'il y ait causalité, ou science, il doit y avoir matérialité, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on est dans l'intention, ou dans « les choses de l'esprit »<sup>4</sup>. Expliquer un fait, c'est « le rapporter à des causes matérielles »<sup>5</sup>, à la différence de l'interprétation d'un fait, qui consiste à « découvrir le sens qu'il a pour un

---

<sup>1</sup> Ibid., p11.

<sup>2</sup> Ibid., p48.

<sup>3</sup> Ibid., p49.

<sup>4</sup> François Sigaud, « La formule de Mauss », *Techniques et culture*, n°40, 2002, p153-168, p2.

<sup>5</sup> Ibid., p2.

sujet »<sup>1</sup>. Pour François Sigaud, « (...) l'interprétation n'a rien de spécifiquement scientifique »<sup>2</sup>. Le besoin d'interpréter viendrait de la compréhension d'une forme mais pas de son contenu<sup>3</sup>.

Il poursuit son raisonnement en évoquant l'animisme, qui correspondrait à un mauvais dosage de l'intention là où il devrait y avoir de l'explication :

« Il me semble peu contestable que nous ayons fortement tendance à mettre du sens, ou plus exactement de l'intentionnel, là où il n'y en a pas, ou d'en mettre trop là où il y en a peu. On pourrait parler d'animisme pour désigner cette tendance, qui n'est pas propre aux sociétés dites primitives, tant s'en faut. L'animisme correspond peut-être à quelque chose de spontané chez l'homme, bien que la conception d'une causalité spécifiquement mécanique le soit sans doute aussi. »<sup>4</sup>

François Sigaud adresse plus particulièrement cette critique à l'anthropologie postmoderne, qu'il considère être trop interprétative et pas assez explicative : « Car les activités humaines ne sont pas seulement intentionnelles, elles sont aussi et d'abord matérielles, le plus souvent même elles sont intentionnellement matérielles. »<sup>5</sup> Il ne faut pas selon lui séparer l'explication de l'intention, ou encore la rationalité de la culture, car elles sont interdépendantes<sup>6</sup>.

Il affirme également que « (...) le va-et-vient des modes dans les sciences sociales est dû à l'insuffisance de leurs moyens de validation. »<sup>7</sup>, et rejette l'idée que les controverses font avancer la science en général<sup>8</sup>.

### *b) Définition de l'efficacité : produire l'effet attendu*

François Sigaud s'interroge ensuite sur ce qu'est l'efficacité technique : l'efficacité serait-elle culturelle ou ethnocentrée ?<sup>9</sup> Pour y répondre, il propose de rapprocher la notion d'efficacité

---

<sup>1</sup> Ibid., p2.

<sup>2</sup> Ibid., p3.

<sup>3</sup> Ibid., p2.

<sup>4</sup> Ibid., p3.

<sup>5</sup> Ibid., p3.

<sup>6</sup> Ibid., p4.

<sup>7</sup> Ibid., p4.

<sup>8</sup> Ibid., p4.

<sup>9</sup> Ibid., p5.

de celle d'utilité<sup>1</sup> : « Être efficace, nous dit le dictionnaire, c'est « produire l'effet attendu », et ce n'est que cela. »<sup>2</sup>

Ainsi, toujours dans l'optique de démontrer les limites de l'anthropologie symétrique, il affirme que « plus les techniques sont « rationnelles », c'est-à-dire banales, familières, ordinairement efficaces, plus elles échappent à l'anthropologie. Il y a là un point qui mérite examen. »<sup>3</sup>

### *c) Les matières premières de l'Afrique*

Selon François Sigaud, « Pour que le concept de technique soit ethnocentré, (...), il faudrait montrer qu'il existe des sociétés dans lesquelles même des activités aussi immédiatement physiques que cracher dans ses mains ou regarder où on met les pieds seraient liées à un symbolisme particulier. »<sup>4</sup> Il définit l'efficacité technique comme le fait de simplement pouvoir produire l'effet attendu.

Pour François Vatin, une telle définition de l'efficacité technique revient à enlever la dimension économique pourtant intrinsèque à la technique, comme Max Weber l'avait fait lorsqu'il tenta de distinguer technique rationnelle d'économie rationnelle. Selon François Vatin, la technique, et avec elle la notion d'efficacité, sont « par nature "économique" ».

Afin de comprendre pourquoi une telle définition de l'efficacité peut entrer en contradiction avec une définition de la technique intrinsèquement économique, il faut peut-être avoir en tête les différences de taux de croissance économique observables entre les différentes cultures dans le monde. La contradiction entre les deux définitions viendrait du fait que pour François Vatin, tout groupe humain a l'intention de produire le même effet : maximisation du développement matériel, qui se mesure par le taux de croissance économique. C'est ce qu'il semble affirmer en conclusion de *L'Espérance-monde* lorsqu'il parle de « civilisation mondiale ».

---

<sup>1</sup> Ibid., p5.

<sup>2</sup> Ibid., p5.

<sup>3</sup> Ibid., p4.

<sup>4</sup> Ibid., p5.

En effet, pour François Vatin, « La question raciale, biologiquement sans fondement et économiquement absurde, reste socialement structurante pour comprendre les hoquets de la mondialisation. »<sup>1</sup> Historiquement, chez l'homme occidental, la prise de conscience de sa propre mortalité s'accompagna progressivement de la peur que sa civilisation meurt<sup>2</sup>. Pour lutter contre cette déchéance, il s'inventa « concessionnaire de la planète » : « De roi de la création qu'il était ou qu'il croyait être, l'homme est monté ou descendu (comme il plaira de l'entendre) au rôle de concessionnaire d'une planète. »<sup>3</sup>

Selon lui, l'Afrique permettrait de sauver la civilisation occidentale, et avec elle l'« humanité »<sup>4</sup>. Car dans cette concession planétaire, c'est sur ce territoire que se trouvent les ressources les plus abondantes, matériellement et peut-être aussi humainement. Son point de vue sur l'Afrique pourrait se résumer ainsi : les Africains, plus que tout autre peuple, habitent sur des terres qui permettront à l'humanité de survivre. Ce qui tombe plutôt bien puisqu'eux même souhaiteraient vivre au niveau de vie des Occidentaux. Pour ce faire, il va falloir créer une « civilisation mondiale »<sup>5</sup>. Qu'est-ce qu'une civilisation mondiale ?

## 4. Histoire globale, par Simon Schaffer & Kapil Raj

### a) L'efficacité, du laboratoire au terrain

En 1994, Simon Schaffer rédigea un essai intitulé *From Physics to Anthropology and back again*, dont le titre est tiré d'un ouvrage de George Stocking publié en 1965 et intitulé *From Physics to Ethnology*. Ce dernier ouvrage s'intéressait à l'évolution de la spécialisation d'un scientifique allemand, Franz Boas, qui passa des études expérimentales sur la perception oculaire et la géographie physiologique, cette dernière correspondant à l'étude des « sauvages », à l'anthropologie (étude des êtres humains sans distinction).

---

<sup>1</sup> François Vatin, « L'économie forestière », in *L'espérance-Monde*, Editions Albin Michel, 2012, p297.

<sup>2</sup> Ibid., p293.

<sup>3</sup> Ibid., p295.

<sup>4</sup> Ibid., p296.

<sup>5</sup> Ibid., p298.

Franz Boas avait un doctorat en physique dont le sujet était l'absorption de lumière colorée dans l'eau. Il travailla dans les domaines de la psychophysique et de la physiologie avec un anthropologue (Rudolf Virchow) à Berlin. Il travailla également dans le domaine de l'astronomie, avec l'astronome Wilhem Foerster à Berlin. C'est au début des années 1880 que Franz Boas commença à s'intéresser à l'anthropologie<sup>1</sup>.

Dans son texte, Simon Schaffer s'intéressa également à William Rivers, scientifique anglais qui étudia la physiologie et la psychologie. Il travailla comme neurologue et psychologue expérimental à Heidelberg puis à la *University College London* et à *Cambridge*, où il était en charge du cours de psychologie expérimentale dans deux universités. Il travailla également sur la mesure de la fatigue. Les travaux les plus importants de William Rivers se trouvaient à l'intersection de la physique, de la pathologie et de la psychologie, et avaient pour thème les illusions d'optique et la perception des couleurs. William Rivers était le directeur d'un laboratoire de psychologie installé sur Murray Island, une des îles de l'archipel du détroit de Torrès, qui se trouve entre l'Australie et la Nouvelle-Guinée. Les insulaires y venaient se faire mesurer leurs performances avec des tubes dans le nez, on les filmait, on enregistrerait leur chanson, ou leur faisait faire des dessins<sup>2</sup>.

Pendant la Première Guerre Mondiale, William Rivers et Franz Boas utilisèrent leurs travaux notamment pour prouver que l'armée anglaise, avec sa tradition de rigidité et d'exhortation sévère, rendait fou les soldats, plutôt qu'elle ne les aidait.

## 2. Travail de laboratoire

### a) L'homme modélisé par les machines

Simon Schaffer précise que les laboratoires ont commencé à se développer pendant le dernier quart du 19<sup>ème</sup> siècle. Dans son laboratoire, Franz Boas utilisa des machines de laboratoire pour faire des expériences psychologiques, le même type de machines que celles utilisées par

---

<sup>1</sup> Simon Schaffer précise que Franz Boas, de confession juive, mena sa carrière sous l'égide de ces trois variables : l'intérêt matériel, le racisme académique et l'esprit libre. *Source* : Simon Schaffer (1994), *From physics to anthropology and back again*, Cambridge: Prickly pears, p14.

<sup>2</sup> Simon Schaffer (1994), *From physics to anthropology and back again*, Cambridge: Prickly pears, p33.

William Rivers sur le terrain. Ces machines étaient d'une très grande importance pour les recherches en physiologie et psychologie dans les années 1890. L'objectif était de construire un modèle de l'être humain. La relation corps – esprit était maintenant étudiée grâce à des machines. Les techniques de la télégraphie et de l'astronomie servaient aussi à mesurer les performances du corps humain : « The human sensory system was supposed to emulate the worldwide communications network which British and German physicists and engineers helped build between the 1860s and the 1880s. »<sup>1</sup>

*b) Auto-expérimentation des scientifiques*

Dans son texte, Simon Schaffer rappelle aussi que les premiers anthropologues testaient sur eux-mêmes leurs propres mesures, dans les laboratoires d'abord, où ils étaient formés, puis sur le terrain qu'ils allaient explorer. Ce sont les scientifiques des générations suivantes qui ont dressé une frontière entre cette pratique et la leur, omettant de mentionner d'où ces pratiques venaient. Pierre Curie par exemple s'est brûlé le bras avec du radium pour observer le temps de cicatrisation et imaginer une utilisation du radium dans les traitements dermatologiques.

Entre avril 1903 et décembre 1907, William Rivers mesura la sensibilité sur la peau de diverses parties du corps d'un de ses collègues physiologues de Cambridge, Henry Head, avec de l'eau chaude, de l'eau froide, une aiguille et un couteau. Le but était de faire des étalonnages. L'avantage de telles expériences menées directement sur eux-mêmes était que lorsque le sujet était scientifique, la complexité des instruments et des techniques de mesure, ainsi que sa formation, était un plus pour l'expérience, et que ces derniers avaient de l'autodiscipline. Le matériel de laboratoire, de physiologie et de psychologie notamment, était suffisamment objectif pour que ce type de subjectivité disparaisse de toute manière.

---

<sup>1</sup> Ibid., p22-23.

### *3. Du laboratoire au terrain*

Un manuel écrit par la *British Association* permettait aux scientifiques de quitter leur laboratoire et de se rendre sur le terrain avec un groupe de règles permettant de conserver la rigueur du laboratoire sur le terrain. C'est ce que firent William Rivers et Franz Boas.

Simon Schaffer trouva que le contenu et la forme des travaux de terrain de William Rivers et Franz Boas dépendaient surtout du souci qu'ils avaient d'être en cohérence avec leur méthode de travail en laboratoire, plutôt que leur souci de s'adapter au lieu et aux personnes qu'ils étudiaient. Franz Boas avait appris de son expérience en laboratoire que les mesures de routine qui y étaient prises dépendaient du jugement subjectif de l'expérimentateur<sup>1</sup>.

Ainsi de nos jours, on considère que le travail de terrain permet d'en apprendre autant sur le scientifique en expédition que sur son objet ou sujet d'étude<sup>2</sup>. Pour certains, la prise en compte de l'enquêteur ou du scientifique dans l'élaboration de son étude nuit à l'objectivité des résultats. Pour Simon Schaffer au contraire, l'étude de l'histoire du travail de terrain en anthropologie permet aussi de faire évoluer l'histoire des sciences.

### *4. Histoire des sciences : géographie des laboratoires*

Jusqu'à une période récente, on considérait que le travail en laboratoire était le même partout, dans n'importe quel laboratoire. Néanmoins, depuis peu et parallèlement à l'étude du travail de terrain, l'étude du travail en laboratoire est devenue plus répandue et on dresse maintenant des cartes du réseau des techniques et des savoirs, avec un accent mis sur la variété des lieux géographiques visités par les scientifiques et dans lesquels des laboratoires furent installés.

---

<sup>1</sup> Ibid., p12.

<sup>2</sup> Ibid.

Toutes ces études auraient-elles pour but de rechercher l'efficacité ailleurs ? C'est ce qu'a tenté de faire Kapil Raj dans ses travaux<sup>1</sup>.

### *b) Kapil Raj, Frontières mouvantes entre science et savoir, une géo-histoire*

Comme Kapil Raj l'expliquait dans son séminaire « Frontières mouvantes entre science et savoir, une géohistoire » (2012 – 2014), même au sein du monde occidental, il y a ceux qui savent et ceux qui ne savent pas. Ceux qui savent sont les scientifiques ; ceux qui ne savent pas sont ceux qui certes possèdent des savoirs mais qui appartiennent à une communauté non scientifique. Le principe de réfutabilité a ainsi permis à Karl Popper d'établir une frontière entre la science d'un côté, la psychanalyse et le marxisme de l'autre.

Selon lui, au 19<sup>ème</sup> siècle, il est devenu tendance pour ceux qui savent de sortir de leurs frontières géographiques. C'était une façon de légitimer leurs savoirs auprès d'une partie de leurs collègues chez qui les recherches de terrain étaient valorisées. Le problème est que lorsqu'on sort des frontières de l'Occident, on retrouve ce même partage, où ceux qui savent empruntent les savoirs qu'ils y trouvent et les traduisent en savoirs scientifiques. Ce qu'a démontré Kapil Raj est que cette frontière entre les scientifiques et les autres n'est pas si nette et si hiérarchique qu'on pourrait le supposer<sup>2</sup>. Plutôt qu'une frontière, c'est une zone d'échange ou « zone de contact », pour reprendre l'expression de Mary-Louise Pratt, où scientifique et détenteur de savoirs se nourrissent mutuellement<sup>3</sup>. L'auteur reconnaît la violence des échanges, mais ne la réduit pas à cela. La « zone de contact » lui sert à décrire une situation d'asymétrie entre deux groupes, les opprimés et les oppresseurs, au sein de laquelle des degrés de liberté existent malgré tout et se renégocient en permanence. C'est le cas par exemple lors de la rencontre entre l'ingénieur écossais Thomas Montgomerie et Mahomed-i-Hameed, puis Nain Singh et Mani Singh, chargés d'effectuer des mesures

---

<sup>1</sup> Kapil Raj, « La construction de l'empire de la géographie. L'odyssée des arpenteurs de Sa Très Gracieuse Majesté, la reine Victoria, en Asie centrale », *Annales. Histoire, Sciences sociales*, Année 1997, Volume 52, Numéro 5 p. 1153 – 1180.

<sup>2</sup> Kapil Raj (2008), *Relocating modern science. Circulation and the Construction of Knowledge in South Asia and Europe, 1650-1900*, Palgrave Macmillan UK.

<sup>3</sup> Mary-Louise Pratt (1992), *Imperial Eyes. Travel Writing and Transculturation*, New York : Routledge.

topographiques en Asie centrale pour le compte de l'empire britannique<sup>1</sup>. Pour prendre ces mesures, Montgomerie demanda à Mahomed-i-Hameed, interprète, de compter ses pas et de mesurer le temps que cela lui prenait avec une montre qu'il lui avait donnée. Montgomerie présenta leurs résultats devant la *Royal Geographical Society* qui les valida. Comme Kapil Raj l'écrit, Hameed était officiellement un « instrument » scientifique. Ce qui permit à Montgomerie de lancer une deuxième mission, au Tibet, avec cette fois Nain Singh, instituteur, et Mani Singh, « responsable des cadastres de son village »<sup>2</sup>, qui utilisèrent, pour compter leurs pas, un chapelet et un moulin à prière, ce qui était plus discret qu'une montre en territoire hostile aux Britanniques. Tous purent prendre des notes sur les différents aspects des territoires qu'ils traversaient pour faire leurs mesures topographiques (démographie, économie, ethnologie, etc.). A la suite de cette mission, Nain Singh devint une « célébrité internationale », recevant une médaille d'or de la *Royal Society of Geography* et de la *Société de Géographie de Paris*. Pour Kapil Raj, « l'élévation de « l'instrument » au rang de pair était cruciale pour légitimer toutes les autres informations collectées par les pandits : ce n'est que par cette reconnaissance que l'on pouvait crédibiliser l'ensemble des observations (sur les habitants, leur mode de vie, leur culture matérielle...) qui constituait à l'époque la géographie »<sup>3</sup>.

Il y eut un certain contexte pour que l'instrument puisse être élevé au rang de pair. A cette époque, la Russie et la Grande-Bretagne étaient dans une sorte de guerre froide. Les Russes cherchaient à imiter les innovations scientifiques des Britanniques, et pour cela envoyèrent, comme eux, des personnes en Asie et notamment au Tibet. Ces personnes, soit se convertissaient et restaient sur place, soit ne trouvaient pas leur place dans la hiérarchie coloniale. Les expéditions russes n'eurent donc pas le même succès que les expéditions indo-britanniques. Kapil Raj raconte que les arpenteurs Britanniques étaient alors fascinés par les religieux qui marchaient en tournant leur roue à prière, ils les comparaient à des instruments. Thomas Montgomerie eut l'idée de s'en inspirer pour créer une carte du Tibet, idée qu'il partagea avec ses employés indiens. Au début des années 1860, ces derniers commencèrent à mettre en application cette idée. Ils habitaient la zone frontalière entre l'Inde et le Tibet, étaient bouddhistes et connaissaient les rituels des moines bouddhistes. Il était

---

<sup>1</sup> Kapil Raj (1997), *ibid.*

<sup>2</sup> *Ibid.*, p1173.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p1177.

donc moins difficile de se faire passer pour eux, de traverser la frontière et d'arpenter le Tibet ainsi, comptant leurs pas. La première expédition fut envoyée en 1863. L'un des arpenteurs Indiens arriva à Lhassa, capitale du Tibet, et y gagna sa vie en enseignant les mathématiques. Il rentra en Inde deux ou trois ans plus tard, reprit son habit de moine pour traverser la frontière et conserva ses notes sur une bande cachée dans sa roue à prières<sup>1</sup>. Les expéditions qui suivirent furent composées de deux ou trois personnes. Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, une cinquantaine de personnes travaillaient sur les cartes du Tibet.

Finalement, on le voit ici, pour Kapil Raj, le problème serait impérial : pour former une civilisation mondiale durable, il faut commencer par reconnaître et penser les différences en son sein.

## *Bilan*

De manière générale, comme François Vatin l'a démontré dans ses divers travaux, le technicien choisit par son calcul ce qui coûte et ce qui ne coûte pas.

Le technicien du 19<sup>ème</sup> siècle a choisi que ce qui coûterait serait le travail mécanique. Le propos de Bernard Grall consistait à illustrer ce cadre de pensée mécanique propre au 19<sup>ème</sup> siècle où tout se mesurait en fonction des économies réalisées en travail<sup>2</sup>.

Cependant, il a vite fallu étendre la palette de choix comme le rappelle Alexandra Bidet et François Vatin : « Si les ingénieurs français ont formalisé au XIX<sup>e</sup> siècle une mesure mécaniste du travail, ils sont aussi les premiers à avoir été confrontés à ce qui la déborde. *De facto* périmée depuis l'invention de la machine à vapeur, la mesure en travail laisse d'autant mieux apparaître ses limites que l'activité productive est de moins en moins réductible à une dépense de force humaine. »<sup>3</sup>

François Vatin et Alexandra Bidet citent l'exemple du bélier hydraulique, machine dont le rendement était calculé en utilisant la définition classique du rendement mécanique c'est-à-

---

<sup>1</sup> Cette bande existe toujours aux archives de Bombay.

<sup>2</sup> Kapil Raj, séminaire de l'EHESS « Frontières mouvantes entre science et savoir. Une géo-histoire (XVIII-XX<sup>e</sup> siècle) », 19 mars 2013.

<sup>3</sup> Alexandra Bidet et François Vatin, « Pratique d'ingénieur et mesure de la valeur : le cas de la téléphonie », Réseau Canopé, Idées économiques et sociales, 2008/2, n°152, p6-16, p12.

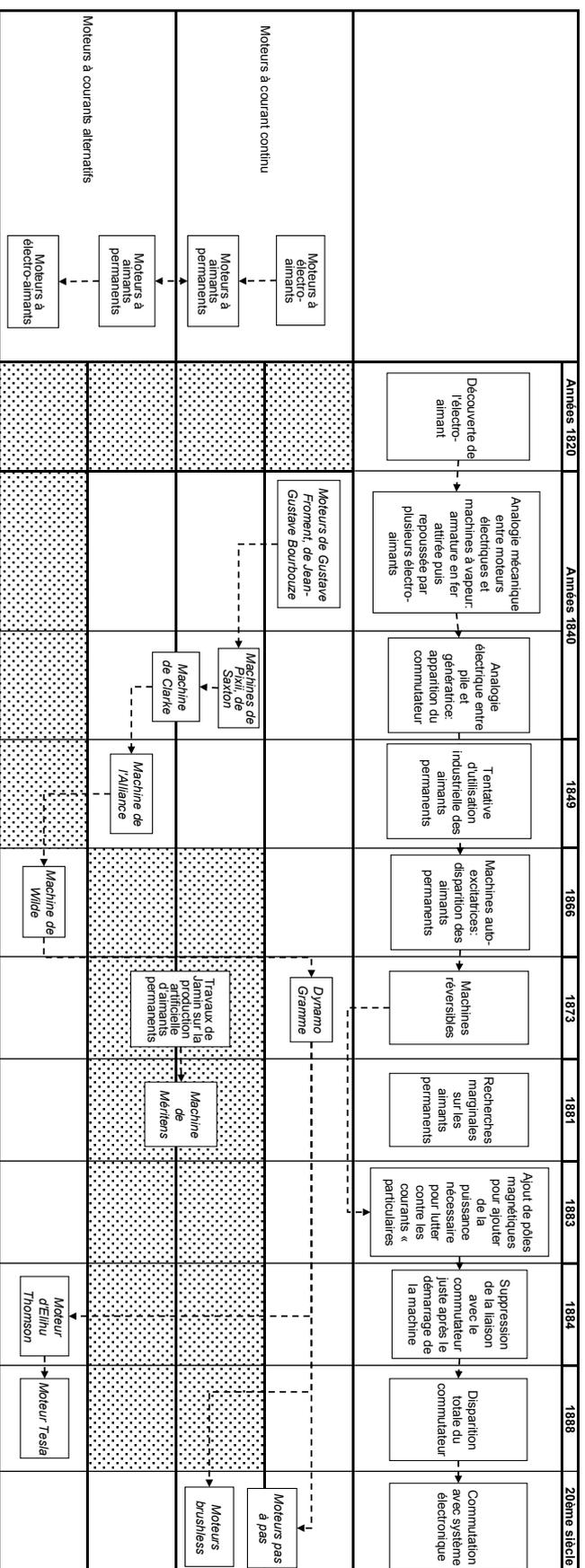
dire en négligeant l'utilité potentielle de l'eau restée en bas. L'exemple du « béliet hydraulique », qui correspond à une pompe à eau qui récupère l'eau en bas d'une chute d'eau et la remonte là où elle est utile, montre bien qu'il y a toujours des choix de valeur quand on calcule un rendement. Pendant son mouvement, une partie de l'eau de la chute n'est pas remontée et continue à s'écouler vers le bas dans le cours d'eau. Le rendement de la pompe était calculé en utilisant la définition classique du rendement mécanique, qui ne prend pas en compte l'utilité potentielle de l'eau qui n'est pas remontée.

Ainsi avec l'écologie, le technicien se voit obligé d'étendre sa palette de choix. Dans ce cadre de pensée propre au 20<sup>ème</sup> siècle post-années 1970, les déchets commencent à être pris en compte dans les calculs. On passe ici d'une mesure mécanique à une mesure écologique.

On peut également distinguer le cadre de pensée mécanique du cadre de pensée du 21<sup>ème</sup> siècle formulé par Bruno Latour, où ce ne sont plus seulement les déchets matériels qui sont mesurés, mais également les déchets humains. On passe ici d'une mesure écologique à une mesure empathique ou éthique.



# Schéma





## Glossaire

### *Aimant*

« Un aimant est, par définition « un corps qui crée un champ magnétique dans l'intervention d'un courant électrique. »<sup>1</sup>

### *Armature*

Les premiers moteurs électriques étaient construits sur ce principe : une armature en fer était attirée puis repoussée par plusieurs électro-aimants. Un article de la revue *La Lumière Electrique*<sup>2</sup> nous apprend que ce terme « armature » a d'abord été utilisé par les Anglais, pour qui « arm » signifie « bras ».

### *Bobine d'induction*

Une bobine d'induction est un appareil électrique alimenté en courant continu qui permet de transformer la tension du courant d'alimentation, en augmentant ou en diminuant sa tension.

### *Champ magnétique*

« La portion de l'espace dans laquelle s'exerce l'action attractive ou répulsive d'un pôle d'aimant a été appelée *champ magnétique* de ce pôle. »<sup>3</sup> Dans son *Traité Théorique et Pratique des Machines Dynamo-Electriques*, Silvanus P. Thompson nous explique que dans une machine électrique,

---

<sup>1</sup> Romuald-Victor Picou (1927), *Les aimants, leur calcul et la technique de leurs applications*, Paris : Dunod, p1.

<sup>2</sup> « Machine dynamo-électrique de M. Weston », *La Lumière Electrique*, Volume 1, n°9, 1er novembre 1879, p172-173.

<sup>3</sup> Henry de Graffigny (1907), « Qu'est-ce que l'électricité », Chapitre 9 : « Magnétisme et électro-magnétisme », p150.

qu'elle fonctionne « comme générateur ou comme moteur, la présence du champ magnétique est nécessaire. »<sup>1</sup>

## *Collecteur*

Le collecteur est une sorte de bague en métal qui permet de recueillir le courant alternatif produit par une machine électrique.

## *Commutateur*

Le commutateur est une sorte de bague fendue qui permet à la fois de recueillir le courant produit par une machine électrique et de le faire changer de sens un courant plusieurs fois par seconde, permettant ainsi de produire un courant continu.

## *Courant alternatif*

Le courant dit « alternatif » est un courant électrique dont le sens de circulation change au cours du temps.

## *Courant continu*

Le courant dit « continu » est un courant électrique indépendant du temps et qui ne circule que dans une seule direction.

---

<sup>1</sup> Silvanus P. Thompson (1886), *Traité Théorique et Pratique des Machines Dynamo-Electriques*. Traduit de l'anglais par E. Boistel, Paris : Baudry.

## *Courants de Foucault*

Les courants de Foucault sont « (...) des courants se fermant sur eux-mêmes dans l'intérieur des masses de métal »<sup>1</sup>.

## *Courants polyphasés*

Le sens d'un courant alternatif variant de manière cyclique, des courants alternatifs polyphasés sont des courants en quelque sorte décalés l'un par rapport à l'autre. Les courants diphasés sont décalés d'un quart de période l'un par rapport à l'autre, et les courants triphasés sont décalés d'un tiers de période.

## *Circuit en parallèle*

Un circuit en parallèle est un circuit électrique pour lequel la tension est la même dans les différents éléments qui le composent.

## *Circuit en série*

Un circuit en série est un circuit électrique dans lequel les tensions s'additionnent.

## *Electro-aimant*

Un électro-aimant est un morceau de fer initialement non aimanté autour duquel est entouré un fil dans lequel circule un courant électrique. Quand le courant circule dans le fil, le morceau de fer s'aimante et se transforme en électro-aimant.

---

<sup>1</sup> Frank Géraldy, « Sur les actions parasites dans les machines dynamo-électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 8, n°16, 24 avril 1883, p510 à 512, p510.

## *Force contre-électromotrice*

Une machine électrique, génératrice ou moteur, dont le circuit est fermé c'est-à-dire dont l'ensemble des composants forment une boucle fermée permettant le passage du courant, produit toujours un courant électrique. Un moteur, une fois mis en mouvement, produit un courant de sens opposé à celui de la génératrice qui l'alimente, du fait de la rotation de son induit dans le champ magnétique de l'inducteur. On parle de force contre-électromotrice<sup>1</sup>.

## *Inducteur*

L'élément inducteur d'une machine électrique est un élément magnétique dont le mouvement devant un autre élément conducteur y induit un courant.

## *Induction*

En 1831 en Angleterre, Michael Faraday (1791 – 1867) trouva le moyen de générer de l'électricité à partir d'un fil conducteur et d'un aimant. Il eut l'idée d'enrouler ce fil autour d'une bobine en bois, creuse à l'intérieur, dans laquelle il déplaça un aimant, ce qui produisit, le temps du déplacement de l'aimant, un courant électrique dans le fil. Il démontra ainsi qu'un aimant pouvait générer ou *induire* de l'électricité dans un fil de fer quand l'un ou l'autre était en mouvement.

## *Induit*

L'élément induit d'une machine électrique est la partie conductrice dans laquelle le courant est généré (grâce au mouvement de l'inducteur).

---

<sup>1</sup> Henri Maréchal (1904), *Les chemins de fer électriques*, Paris : Librairie polytechnique Ch. Béranger, p308.

## *Intensité*

L'intensité du courant  $I$  correspond à la quantité d'électricité qui traverse un circuit à un instant donné. Elle dépend à la fois de la tension du courant  $U$  et de la résistance du conducteur  $R$  dans lequel il circule. La relation entre ces trois grandeurs est donnée par la loi d'Ohm :  $U = R * I$ .

## *Machine auto-excitatrice*

Une machine auto-excitatrice est une machine électrique qui peut elle-même fournir le courant nécessaire pour activer les électro-aimants qui la composent.

## *Machine dynamo-électrique*

Une machine dynamo-électrique est une machine uniquement composée d'aimants artificiels ou électro-aimants.

## *Machine magnéto-électrique*

Une machine magnéto-électrique est une machine à la fois composée d'aimants permanents et d'électro-aimants.

## *Moteur à champs tournants*

Dans les moteurs à champ tournant, les électro-aimants étaient alimentés par des courants alternatifs polyphasés venant de la ligne de distribution, et produisaient un champ magnétique tournant. Ce champ magnétique induisait des courants dans l'armature, ou rotor du moteur, ce qui le mettait en rotation, sans qu'il y ait besoin d'avoir recours à un collecteur ou commutateur.

L'armature pouvait soit être une cage d'écureuil en fer, lorsque les moteurs avaient une faible puissance allant jusqu'à 3 ou 4 kW, soit, pour les puissances plus élevées, deux ou trois bobines fermées sur elles-mêmes. Le nom cage d'écureuil venait sans doute d'une analogie dans la forme avec la roue en bois des premiers monte-charge, datant du Moyen-âge et qualifiés de « cage d'écureuil ».

## *Moteur synchrone*

Un moteur asynchrone est un moteur électrique à courant alternatif dont la vitesse est indépendante de la fréquence du courant alternatif reçu.

## *Moteur synchrone*

Un moteur synchrone est un moteur électrique à courant alternatif dont la vitesse de rotation dépend de la fréquence du courant alternatif reçu.

## *Tension ou force électromotrice*

On appelle potentiel ce qui caractérise l'état électrique d'un corps. Deux corps fermés à des potentiels différents réunis par un conducteur produisent un courant électrique dans ce conducteur, qui cessera quand les deux corps seront au même potentiel. Plus généralement, on appelle électricité l'ensemble des phénomènes provoqués par des différences de potentiel. En 1907, le journaliste scientifique Henry de Graffigny donnait la définition suivante d'une différence de potentiels électriques :

« (...) De même qu'à une différence de niveau entre deux points d'une colonne liquide correspond une pression, à une différence de potentiel électrique correspond une pression électrique, et c'est cette pression qui détermine le mouvement des masses électriques. On lui donne ordinairement le nom de tension. »<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Henry de Graffigny (1907), *Qu'est-ce que l'électricité*, p168.

Différence de potentiels et forces électromotrices sont synonymes : en un point d'un circuit électrique, une force électromotrice est la cause d'une différence de potentiels.

## *Transformateur*

Une bobine d'induction est un appareil électrique alimenté en courant alternatif qui permet de transformer la tension du courant d'alimentation, en augmentant ou en diminuant sa tension.

## **Bibliographie**

### *A*

Madeleine Akrich, Michel Callon, Bruno Latour, « A quoi tient le succès des innovations ? 1 : L'art de l'intéressement ; 2 : Le choix des porte-parole », *Gérer et Comprendre. Annales des Mines, Les Annales des Mines*, 1988, pp4-17 & 14-29.

Armangaud, « Biographie de M. Ruhmkorff, fabricant d'instruments de précision, à Paris », *Le Génie industriel*, Juillet 1866, p24.

### *B*

M. Barlet, « Rapport sur les procédés et les appareils de chauffage et d'éclairage », « Eclairage électrique », *Exposition universelle de 1878*, Paris : Imprimerie nationale.

William Baxter, « Electric Motors », *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1886-1887, p377.

Alexandra Bidet et François Vatin, « Pratique d'ingénieur et mesure de la valeur : le cas de la téléphonie », *Idées économiques et sociales*, 2008/2 N° 152, p6-16.

« Rapport fait par M. Edmond Becquerel, au nom du comité des arts économiques, sur un appareil électro-magnétique présenté par M. Ruhmkorff, ingénieur mécanicien, *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1855, 2<sup>ème</sup> semestre, p765.

Edmond Becquerel, « Applications de l'électricité considérée au point de vue dynamique », Section III, Classe 64 : « Matériel et procédés de la télégraphie », Groupe 6 : « Instruments et procédés des arts usuels », *Rapport du jury international de l'Exposition Universelle de 1867*, p37 à 42.

Louis Bell, *Proceedings of the National Electric Light Association*, Février 1892, p139-140.

Louis Bell, "Power transmission for central stations", *Proceedings of the National Electric Light Association*, Fév. - Mars 1893, p151 à 166.

Joseph Bertrand, « Des Progrès de la Mécanique – M. Marcel Deprez », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°41, 13 octobre 1883.

René Bied-Charreton, « L'utilisation de l'énergie hydraulique. Ses origines, ses grandes étapes », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*. 1955, Tome 8, n°1, pp. 53-72.

Pierre Birnbaum (sous la direction de), *La France de l'affaire Dreyfus*, Editions Gallimard, 1994.

Evelyne Bloch-Dano (2004), *Madame Proust*, Grasset.

Julien Boulanger, « Expériences de M. Marcel Deprez à Grenoble sur le transport et la distribution de la force par l'électricité », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°45, 10 novembre 1883, p322.

Edmond Bouty et Julien Lefèvre (1891), *Dictionnaire d'électricité comprenant les applications aux sciences, aux arts et à l'industrie à l'usage des électriciens, des ingénieurs, des industriels, etc.*, Paris : Librairie J.-B. Baillière et Fils.

Jean Bouvier (1964), *Les deux scandales de Panama*, France : René Julliard.

Charles S. Bradley, « Long distance transmission of power », *Proceedings of the National Electric Light Association*, Février – Mars 1893, p142 à 150, p147.

Niaudet Bréguet, « Machine magnéto-électrique de Gramme », *La Nature*, 1873, p341 à 365, p344.

## C

J. F. Gustave Cabanellas, « Quelques mots sur le sulfate de quinine », *Société Médicale de l'arrondissement de l'Elysée (ancien 1<sup>er</sup> arrondissement)*, 5 janvier 1860.

Ministère des Postes et Télégraphes, « Annexe III – Communication de M. Gustave Cabanellas », *Congrès international des électriciens. Comptes-rendus des travaux*, 1881, Paris : G. Masson.

Gustave Cabanellas, « Le transport à grande distance par l'électricité en vue de distribuer automatiquement l'énergie sous ses différentes formes : chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique ; par M. G. Cabanellas », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1885, p258 à 281.

Gustave Cabanellas, « Mémoire sur les principes théoriques et conditions techniques de l'application de l'électricité au transport et à la distribution de l'énergie sous les principales formes chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique », *Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils*, Volume 47, 1887, 1<sup>er</sup> semestre,.

*Lettre de M. Gustave Cabanellas à M. Drumont, 18 novembre 1886, Paris : G. Masson.*

Jean Armengaud, « Notice nécrologique sur Gustave Cabanellas », *Société des Ingénieurs Civils*, 1888, 2<sup>ème</sup> semestre, Séance du 19 octobre 1888, p644 à 648.

Nécrologie de Gustave Cabanellas, *La Lumière Electrique*, 1888, Volume 30, p98.

Nécrologie de Gustave Cabanellas, *Société des Ingénieurs Civils*, 1888, p644-647.

Nécrologie de Gustave Cabanellas, *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1889, p169.

Michel Callon, « L'État face à l'innovation technique : le cas du véhicule électrique », *Revue française de science politique*, 29<sup>ème</sup> année, n°3, 1979, pp. 426-447.

Michel Callon, « La domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc », *L'année sociologique*, 1986, 36.

François Caron et Fabienne Cardot, sous la direction de (1991), *Histoire Générale de l'Electricité, Tome Premier, 1881 - 1918*, Paris : Fayard.

Emmanuel Chadeau, « L'épargne nationale trahie », dans Pierre Birnbaum (sous la direction de), *La France de l'affaire Dreyfus*, Editions Gallimard, 1994, p362-384, p371.

Roger Chavannes, « Théorie élémentaire des machines magnéto- et dynamo-électriques », *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, Volume 17, Cahier 86, p601.

P. Clémenceau, « Chronique. Sur la conférence de M. G. Cabanellas à l'Observatoire de Paris », *La Lumière Electrique*, Volume 18, 1885, p134-135.

G. Colombo, « Le système Gaulard et Gibbs à l'Exposition de Turin », *La Lumière Electrique*, Volume 14, n°41, 11 octobre 1884, p46.

E. Cuvelette, « L'emploi des gaz des fours à coke », *Comptes rendus de la Société des Ingénieurs Civils*, 1908, 2ème semestre, séance du 4 décembre p1002 à 1004, p1002-1003.

## D

Paul A. David (1987), *The Hero and the Herd in the Technological History : Reflections on Thomas Edison and "the Battle of the Systems"*, Center for Economic Policy Research, Stanford University.

R. Debré, « L'utilisation électrique du vent », *La Nature*, 1911, 2ème semestre, p11.

« Expérience sur la transmission de force par l'électricité, Note de M. G. Dehenne », Séance du 5 août 1887, *Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils*, 1887, 2ème semestre, p91.

Ph. Delahaye, *Revue Industrielle*, 12 décembre 1883, p498.

Ph. Delahaye, « Chronique », *Revue Industrielle*, 11 juin 1884, p237.

Ph. Delahaye, « Transmission de la force électrique entre Paris et Creil », *Revue Industrielle*, 26 août 1886.

Ph. Delahaye, « Chronique », *Revue Industrielle*, 30 septembre 1886, p398.

E. Demoget, « Machine magnéto-électrique de M. Demoget », *La Lumière Electrique*, Volume 1, n°4, 15 juillet 1879, p75 à 78.

Marcel Deprez, « Le mesureur d'énergie », *La Lumière Electrique*, Volume 2, n°7, 1er avril 1880, p133 ; n°9, 1<sup>er</sup> mai 1880, p170-171.

Marcel Deprez, « Des locomotives électriques », *La Lumière Electrique*, n°20, 15 octobre 1880, pp410-412 ; n°22, 15 novembre 1880, pp453-454.

Lettre de M. Marcel Deprez, *La Lumière Electrique*, Volume 2, n°24, 15 décembre 1880, p511.

Marcel Deprez, « La Transmission Electrique du Travail à Grande Distance », *La Lumière Electrique*, Volume 4, n°38, 10 août 1881.

Réponse de Marcel Deprez à O. Froelich, *La Lumière Electrique*, 25 février 1882, p190.

Marcel Deprez, « Recherches expérimentales sur les machines dynamo-électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 6, n°16, 22 avril 1882, p364 à 366.

Correspondance de Marcel Deprez, *La Lumière Electrique*, n°25, 24 juin 1882, p598-599.

« Conférence de M. Marcel Deprez sur le transport et la distribution de l'énergie », *La Lumière Electrique*, n°25, 24 juin 1882, p23.

« Projet de transport Electrique de la force de München à Augsbourg, par M. M. Deprez », *La Lumière Electrique*, n°30, 29 juillet 1882, p120.

Marcel Deprez, « Sur les générateurs secondaires de MM. Gaulard et Gibbs », *La Lumière Electrique*, Volume 14, n°41, 11 octobre 1884, p41.

Marcel Deprez, « Sur une application de la transmission électrique de la force faite à Bourgneuf », *La Lumière Electrique*, Volume 33, n°38, 21 septembre 1889, p551 à 557, p552.

Marcel Deprez, « Sur la transformation directe de la chaleur en énergie électrique », *L'Eclairage Electrique*, 1897, Tome 13, n°43, 23 octobre 1897, p184.

Thèse de 2008 de Stéphanie Deproux, « Un héritage des Bonaparte : Le prix du galvanisme (1802-1815) et le prix Volta (1852-1888). L'État et l'encouragement à la recherche sur l'électricité », Ecole des Chartes.

MM. Derome et Boreux, « Note sur le Metropolitan Railway ou chemin de fer souterrain de Londres », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, Tome XV, Février 1868, p105.

Emile Desbeaux (1891), *Physique Populaire*, par Emile Desbeaux, Editions Flammarion.

E. Desroziers « Sur les lampes à incandescence du type Cruto », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1885, p131-143, p131 à 133.

Albin Dumas (1901), *Le Chemin de fer métropolitain de Paris. Description du réseau projeté- Lignes actuellement exécutées - Usine de Bercy - Exploitation des lignes en service - Lignes actuellement en construction*, Paris : Le Génie civil, p12.

## E

W. L. R. Emmet, « Distribution of Light and Power by Alternating Currents », *Proceedings of the National Electric Light Association*, Mai 1896, p109 à 128, p125.

G. Espitallier, « Le train routier du colonel Renard », *La Nature*, 1904, p91-94.

## F

Amédie Fayol, « Sir Humphry Davy », *La Nature*, 1951, p286-287.

Noël J. Felici, « La préhistoire du moteur électrique », *Bulletin d'histoire de l'électricité*, n°5, juin 1985, p53 à 66.

Galileo Ferraris, « Recherches Théoriques et Expérimentales sur le Générateur Secondaire », *La Lumière Electrique*, n° 24, 20 juin 1885.

Louis Figuier (1867), *Les Merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes, Tome 1, Machine à vapeur, bateaux à vapeur, locomotive et chemins de fer, locomobiles, machine électrique, paratonnerres, pile de Volta, électro-magnétisme*, Paris : Jouvett Furne, p490-491.

Louis Figuier (1884), *Les nouvelles conquêtes de la science. L'électricité / par Louis Figuier*, Paris : Librairie illustrée.

Nécrologie d'Hippolyte Fontaine, *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1910, p127.

George Forbes, « Variétés. La transmission électrique de la puissance des chutes du Niagara », *La Lumière Electrique*, Volume 50, n°49, 9 décembre 1893, p492.

W. Fritsche, « Sur les stations centrales d'éclairage électrique », *La Lumière Electrique*, Volume 28, n°19, 12 mai 1888, p254.

« Sur la théorie des machines dynamo-électriques et la distribution de l'énergie de M. Marcel Deprez par O. Froelich », *La Lumière Electrique*, 25 février 1882, p189.

Oskar Frölich, « Sur le transport Electrique de la Force », *La Lumière Electrique*, Volume 8, n°12, 24 mars 1883, p364 à 376.

Emmanuel Fureix et François Jarrige (2015), *La modernité enchantée. Relire l'histoire du XIXe siècle français*, Paris : Editions La Découverte.

## G

Lucien Gaulard, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°52, 29 décembre 1883, p573.

Lucien Gaulard, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 11, n°2, 12 janvier 1884, p136.

Lucien Gaulard, « Générateur secondaire modifié. Régulateur de courants », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1, 1884, p409.

Lettre de MM. Gaulard et Gibbs, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 18, n°40, 3 octobre 1885, p44.

Lucien Gaulard, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°52, 29 décembre 1883, p573.

Lucien Gaulard, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 14, n°43, 25 octobre 1884, p156.

Lucien Gaulard, « L'éclairage électrique de Tours », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1886, p107.

Nécrologie de Lucien Gaulard, *La Lumière Electrique*, Volume 30, n°49, 8 décembre 1888, p498.

Nécrologie de Lucien Gaulard, *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1889, p168.

Nicholas Georgescu-Roegen (1969), *La science économique. Ses problèmes et ses difficultés*, Paris : Dunod.

Frank Géraldy, « Causeries électriques – Le poste central des télégraphes à Paris, *La Lumière Electrique*, Volume 1, n°10, 15 novembre 1879, p190 à 193, p192.

Frank Géraldy, « Exposition Internationale d'Electricité de Munich – A Propos de l'Expérience du Transport de la Force », *La Lumière Electrique*, n°43, 28 octobre 1882, p424-425 et n°44, 4 novembre 1882, p448-449.

Frank Géraldy, « Sur les actions parasites dans les machines dynamo-électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 8, n°16, 24 avril 1883, p510 à 512, p512.

Frank Géraldy, « Le moteur électrique de A. Bessolo. Le moteur électromagnétique à anneau ouvert de C. W. Siemens », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°49, 8 décembre 1883, p462 à 468.

Frank Géraldy, « Sur les Essais du Système Gaulard et Gibbs », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°50, 15 décembre 1883, p496.

Frank Géraldy, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 10, n°52, 29 décembre 1883, p573.

Frank Géraldy, « Correspondance », *La Lumière Electrique*, Volume 11, n°2, 12 janvier 1884, p136.

Henry de Graffigny (1907), *Les moteurs électriques*, Paris : Librairie des publications populaires.

Henry de Graffigny (1907), *La Lumière électrique : générateurs d'électricité, dynamos et alternateurs accumulateurs, distribution de la lumière, éclairage à air, éclairage par incandescence*, volume 2 in Petite bibliothèque d'électricité pratique, 10 volumes, Paris : Librairie des publications populaires.

Bernard Grall (2004), *Économie de forces et productions d'utilités – L'émergence du calcul économique chez les ingénieurs des Ponts et Chaussées (1831 – 1891)*, Rennes : Presses Universitaires de Rennes.

M. Grenier, « Note sur les chemins de fer aux Etats-Unis d'Amérique », *Mémoires et compte-rendu des travaux de la société des ingénieurs civils*, Volume 9, 1856, p110.

H. de Grièges, « Des progrès de la traction électrique dans les chemins de fer français », *Mémoires et compte-rendu de la Société des Ingénieurs Civils*, 1896, 1<sup>er</sup> semestre, Volume 65, p196 à 203.

Auguste Guérout, « Les Expériences de Chatham », *La Lumière Electrique*, 3, n°16, 16 avril 1881.

Auguste Guérout, « Recherches sur la Machine Dynamo-Electrique faites chez MM. Siemens et Halske par le Dr O. Frölich », *La Lumière Electrique*, 4, n°28, 6 juillet 1881, p17 à 22.

Auguste Guérout, « Les chemins de fer électriques et la transmission de la force par l'électricité, par M. Alexandre Siemens », *La Lumière Electrique*, Volume 4, n°29, 9 juillet 1881, p42 à 45.

Auguste Guérout, « Exposition Internationale d'Electricité. Les moteurs électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 4, n°43, 27 août 1881, p262 à 264, p262.

C.-F. Guilbert, « Transport d'énergie Saint-Maurice – Lausanne. Système Thury », *L'Eclairage Electrique*, Volume 32, n°28, 12 juillet 1902, p42.

## H

A. H., « Horloge pour compteurs à double tarif », *La Lumière Electrique*, Volume 48, n°26, 1<sup>er</sup> juillet 1893, p618 à 620.

Pierre-Cyrille Hautcoeur, Angelo Riva, Eugene N. White, "Floating a "Lifeboat": the Banque de France and the Crisis of 1889", Manuscript Number: 14-024 NOV13 CRN ARTICLER1, p7.

Cornelius Herz, « Transport Electrique de la force. Expériences du chemin de fer du Nord », *La Lumière Electrique*, Volume 8, 3 mars 1883, p271 à 283.

Cornelius Herz, « Transport Electrique de la Force à Grande Distance », *La Lumière Electrique*, volume 10, n°41, 13 octobre 1883.

A. Hess, « Les inventions, recherches et écrits de Nikola Tesla, par T. C. Martin », *La Lumière Electrique*, Volume 53, n°27, 7 juillet 1894, p46.

Edouard Hospitalier, « Nouvelle machine dynamo-électrique de M. de Méritens », *La Lumière Electrique*, n°7, 1<sup>er</sup> avril 1880, Volume 2, p135.

Edouard Hospitalier, « Galvanomètre de torsion de MM. Siemens et Halske », *La Lumière Electrique*, n°19, 1<sup>er</sup> octobre 1880, p396-397.

Édouard Hospitalier, « À propos des mesureurs de courant de M. Deprez », *La Lumière Electrique*, Volume 2, n°23, 1<sup>er</sup> décembre 1880, p488.

Edouard Hospitalier, « L'électricité et la locomotion », *La Lumière Electrique*, volume 2, n°24, 15 décembre 1880, p501-502.

Edouard Hospitalier, « L'éclairage électrique à l'Exposition d'Electricité. I. Les générateurs. II. Les foyers. L'éclairage par incandescence », *La Nature*, 1881, 2<sup>ème</sup> semestre.

Édouard Hospitalier, « Les transformateurs d'énergie électrique », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1, 1884, p120-121

Edouard Hospitalier, « Moteurs et machines dynamo-électriques », *La Nature*, 1885, 2ème semestre, p75.

Edouard Hospitalier, « Répulsions et rotations électrodynamiques. Expériences de M. Elihu Thomson », *La Nature*, 1889, 2ème semestre, p145.

Edouard Hospitalier, « Expériences de M. Tesla sur les courants alternatifs de grande fréquence », *La Nature*, 1891, 2ème semestre, p162 à 167.

Edouard Hospitalier, « Sur la limite pratique des hauts potentiels appliqués au transport de l'énergie électrique », *l'Industrie électrique*, 1892, p198.

Edouard Hospitalier (1902), *L'Electricité à l'Exposition de 1900. 7. Les moteurs électriques et leurs applications*, Paris : Dunod.

Thomas P. Hughes (1983), *Networks of Power: Electrification in Western Societies, 1880-1930*, Baltimore, John Hopkins University Press.

Maurice Hutin, Maurice Leblanc, « Etude sur les courants alternatifs et leur application au transport de la force », *La Lumière Electrique*, n°18, 2 mai 1891, p202.

Maurice Hutin et Maurice Leblanc, « Réflexions sur le second principe de la théorie mécanique de la chaleur, à propos de la conférence de M. Tesla », *La Lumière Electrique*, Volume 43, n°10, 5 mars 1892, p451.

## I

Ivan Illich (1973), *La convivialité*, Editions du Seuil.

## J

Moritz Hermann Jacobi, « Mémoire sur la théorie des machines électromagnétiques », *Annales de chimie et de physique*, 3ème série, n°34, 1852, p451-484.

Jules Jamin, « Sur la théorie de l'aimant normal et sur le moyen d'augmenter indéfiniment la force des aimants, par M. J. Jamin », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, année 1874, Série 3, Tome 1, p45-50.

Jules Jamin, « Sur la conductibilité des tensions magnétiques, par M. Jamin », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, année 1874, Série 3, Tome 1, p456-461.

Paul Janet, « Progrès réalisés dans la grande industrie électrique pendant le dernier siècle », *Le Génie Civil*, numéro spécial : « L'évolution et le développement des principales industries depuis cinquante ans (1880 – 1930), 1930.

H. Josse, « Electricité », *Revue Industrielle*, 4 janvier 1882, p1.

E. Juillard, « L'œuvre de l'ingénieur », *Bulletin de la Suisse Romande*, 1950, p30.

## K

Ernst Kapp (1877), *Principes d'une philosophie de la technique*, Traduit par Grégoire Chamayou, ancien élève de l'ENS LSH, agrégé de philosophie, enseignant à l'Université de Paris X – Nanterre, Vrin.

Bruno Karsenti, « Techniques du corps et normes sociales de Mauss à Leroi-Gourhan », *Intellectica*, n°26-27, 1998, p227-239.

L. Krieger, « Les voitures électromobiles », *La Nature*, Volume 85, 1905, 2<sup>ème</sup> semestre.

Pierre Kropotkine (1910), *Champs, Usines et Ateliers, ou l'industrie combinée avec l'agriculture et le travail cérébral avec le travail manuel*, Paris : P.-V. Stock.

Thomas Kuhn (1990), *La Tension Essentielle. Tradition et changement dans les Sciences*. Paris : Gallimard.

## L

Joseph Laffargue, « Utilisation de la force du vent. Le moulin électrique de Cleveland (Etats-Unis), *La Nature*, 1891, 1er semestre, p98.

Auguste Lalance, « Note sur des essais d'anhracite anglais faits à l'usine du secteur de Clichy, à Paris, par M. Aug. Lalance », *Bulletin de la Société des Ingénieurs Civils*, 1897, 2<sup>ème</sup> semestre, p953-954.

Bruno Latour, « Lettre à mon ami Pierre sur l'anthropologie symétrique », *Ethnologie française*, T. 26, No. 1, « Culture matérielle et modernité » (Janvier-Mars 1996), pp. 17-31, Presses Universitaires de France, p34.

Bruno Latour, « Prendre le pli des techniques », Numéro spécial de la revue *Réseaux*, Aout-Septembre 2010, Volume 28, n°163, p13-31.

Maurice Leblanc, « Etude sur la Distribution de l'Energie par l'Electricité », *La Lumière Electrique*, n° 29, 20 juillet 1889, p102.

Maurice Leblanc, « Allocution du président de la Société Internationale des Electriciens », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1906, p211 à 217.

P.-H. Ledeboer, « Chemins de fer et tramways électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 34, n°48, 30 novembre 1889, p418-423 ; n°49, 7 décembre 1889, p472-480 ; n°52, 28 décembre 2014, p611-615, p418.

Pierre Lemonnier et Bruno Latour (1994), *L'intelligence des techniques*, Paris : La Découverte, p13.

Pierre Lemonnier, « Et pourtant ça vole ! L'ethnologie des techniques et les objets industriels », *Ethnologie française*, T. 26, No. 1, « Culture matérielle et modernité » (Janvier-Mars 1996), pp. 17-31, Presses Universitaires de France.

André Leroi-Gourhan (1945), *Milieu et techniques*, Paris : A. Michel, 1973.

A. Letorey, « Sur des tentures artistiques », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1881, 3ème série, Tome 8, p434.

Maurice Lévy, « Rendement du Transport de la Force par l'Electricité », *La Lumière Electrique*, 10 décembre 1881, p363.

Maurice Lévy, « Arts Physique. Sur le Transport Electrique de l'Energie, par M. Maurice Lévy, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Professeur à l'Ecole Centrale, suppléant au Collège de France », *Bulletin de la Société d'Encouragement de l'industrie nationale*, 1882, p130 à 142, p132.

Félix Benjamin Lucas, « Mémoire sur les Machines magnéto-électriques et l'arc voltaïque des phares », *Annales des Ponts et Chaussées*, 1885.

Félix Benjamin Lucas (1892), *Traité pratique d'électricité, à l'usage des ingénieurs et des constructeurs*, Paris : Librairie polytechnique Baudry et Cie, p330-331.

## M

« Les progrès successifs dans la carbonisation de la houille au point de vue de la récolte des sous-produits, par M. Paul Mallet, ingénieur des Arts et Manufactures, ancien membre de la Chambre de commerce de Paris », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1916, 1er semestre, p93 à 116, p115-116.

Henri Maréchal (1904), *Les chemins de fer électriques*, Paris : Librairie polytechnique Ch. Béranger.

Thomas Commerford Martin, « History and Progress of Electricity as Applied to Motors », *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1886, p42 à 64, p43.

Marcel Mauss, « Les techniques du corps », *Journal de Psychologie*, vol. xxxii, no 3-4, 15 mars-15 avril 1935.

Marcel Mauss, « Les techniques et la technologie », *Revue du MAUSS*, 2004/1 (no 23), p.434-450.

John Stuart Mill (1893, 5<sup>ème</sup> édition), *Auguste Comte et le positivisme*, Paris : F. Lacan.

Théodore du Moncel (1873), *Exposé des Applications de l'Electricité. Tome 2*, Paris : Librairie scientifique, industrielle et agricole Eugène Lacroix.

Théodore du Moncel (1878), *Exposé des Applications de l'Electricité. Tome 5, 3<sup>ème</sup> édition*, Paris : Librairie scientifique industrielle et agricole Eugène Lacroix.

Théodore du Moncel, « Le rendement électrique », *La Lumière Electrique*, Volume 7, n°49, 9 décembre 1882, p551 à 557.

Théodore du Moncel, « Transport de la force par une ligne télégraphique entre Munich et Miesbach », *La Lumière Electrique*, n°5, 3 février 1883, p129 à 132.

Jules-Armand Montpellier (1902), *L'électricité à l'Exposition de 1900. 3e fascicule. Générateurs d'énergie électrique*, Paris : Dunod.

J. Morin, « Sur un perfectionnement des machines magnéto-électriques de l'Alliance », *La Lumière Electrique*, 1885, n°43, 24 octobre 1885, Volume 18, p175.

Dan Mrkich (2004), *Nikola Tesla. The European Years*, Nikola Tesla Museum.

Lewis Mumford (1934), *Technique et civilisation*, Traduit par Denise Moutonnier (1950), Paris : Editions du Seuil.

Lewis Mumford (1967), *Le mythe de la machine*, Fayard, Traduction en 1973.

Pierre Musso (1998), *Télécommunications et philosophie des réseaux*, Editions PUF.

Pierre Musso, *La raison du Réseau*. In: *Quaderni*, n°52, Automne 2003. *Secret et pouvoir : les faux-semblants de la transparence*. pp. 55-66.

Pierre Musso (2003), *Critique des réseaux*, Editions PUF.

## N

Alfred Niaudet, « Machine magnéto-électrique Gramme à courants continus », *Revue Industrielle*, 1872.

Alfred Niaudet, « Machine magnéto-électrique de Gramme », *La Nature*, 1873, p341 à 365.

Nicholls, "Meters vs. Flat rates", *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1894, p336.

## P

Georges Pellissier, « La tarification de l'énergie électrique », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1898, Paris : Gauthiers-Villars et Fils, p395-415.

Alfred Picard, *Rapport général de l'Exposition Universelle Internationale de 1889, Tome 7ème. L'outillage et les procédés des industries mécaniques. L'électricité*, Paris : Imprimerie Nationale.

Romuald-Victor Picou, « Les transformateurs », *La Lumière Electrique*, 1889, p392.

Romuald-Victor Picou (1927), *Les aimants, leur calcul et la technique de leurs applications*, Paris : Dunod.

A. Potier, « Appareils du professeur Elihu Thomson », *Exposition universelle internationale de 1889 à Paris. Rapports du jury international*, Paris : Imprimerie nationale, 1892, p509.

Mary-Louise Pratt (1992), *Imperial Eyes. Travel Writing and Transculturation*, New York : Routledge.

## R

E. R., « Moteurs Tesla alimentés par des circuits alternatifs à double fil avec une période unique », *La Lumière Electrique*, Volume 51, n°6, 10 février 1894, p281.

Arthur Raffalovich, « L'effondrement du Comptoir d'Escompte », *Le Journal des Economistes*, 15 juin 1889, p330.

Girolamo Ramunni (1994), « Marcel Deprez (1843-1918), professeur d'électricité industrielle (1890-1918) », in Claudine Fontanon et André Grelon (dir.), *Les Professeurs du Conservatoire national des arts et métiers. Dictionnaire biographique 1794-1955*. Paris, INRP et CNAM, t. I, p405-418.

Kapil Raj, « La construction de l'empire de la géographie. L'odyssée des arpenteurs de Sa Très Gracieuse Majesté, la reine Victoria, en Asie centrale », *Annales. Histoire, Sciences sociales*, Année 1997, Volume 52, Numéro 5 p. 1153 – 1180.

Kapil Raj (2008), *Relocating modern science. Circulation and the Construction of Knowledge in South Asia and Europe, 1650-1900*, Palgrave Macmillan UK.

W. Rechniewski, « Les transformateurs à courants continus », *La Lumière Electrique*, Volume 26, n°48, 26 novembre 1887, p416.

W.-C. Rechniewski, « Moteurs électriques à courants alternatifs », *La Lumière Electrique*, Volume 32, 1889, p301 à 306.

Carole Reynaud-Paligot (2006), *La République raciale*, PUF.

Jean Reyval, « Transport d'énergie électrique de Moutiers à Lyon », *L'Eclairage Electrique*, 5 janvier 1907, p13.

Gustave Richard, « Quelques applications mécaniques de l'électricité », *La Lumière Electrique*, Volume 34, n°44, 2 novembre 1889, p213 à 222, p221.

Léo Robida, « Le salon de l'automobile. Septième exposition internationale de l'automobile, du cycle et des sports », *La Nature*, 1904, p70-71.

## S

Emile Saillard, *Journal de Pontarlier*, 25 avril 1897.

Paul Samuel, « Sur les travaux de M. Planté : accumulation et transformation de l'électricité voltaïque », *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1885, p227 à 237.

Jules Sarcia, « Sur le Transport de la Force à Grande Distance », *La Lumière Electrique*, 10 mars 1882.

Simon Schaffer et Steven Shapin (1993), *Léviathan et la pompe à air, Hobbes et Boyle entre science et politique*, La Découverte.

Simon Schaffer (1994), *From physics to anthropology and back again*, Cambridge: Prickly pears.

Wolfgang Schivelbusch (1993), *La Nuit désenchantée*, Paris : Gallimard.

E. Sérafon (1898), *Les tramways, les chemins de fer sur routes, les automobiles et les chemins de fer de montagne à crémaillère*, Paris : Boyveau et Chevillet, p15-16.

F. Sérafon (1872), *Étude sur les chemins de fer, les tramways et les moyens de transport en commun à Paris et à Londres suivie d'une Notice sur la construction et l'exploitation des tramways*, Paris : Dunod, p76.

Sidney H. Short, « Why is Electricity not Used for Car Propulsion ? », *Street Railway Journal*, 1888, p114 – 116.

H. Otto Sibum (2003), « Experimentalists in the Republic of Letters », *Science in Context*, 16, pp 89-120. doi:10.1017/S0269889703000747.

François Sigaud, « La formule de Mauss », *Techniques et culture*, n°40, 2002, p153-168.

J. Simey, « L'électrification du réseau des tramways de la Compagnie générale des Omnibus de Paris », *La Lumière Electrique*, Volume 20, n°48, 30 novembre 1912, p272.

Gilbert Simondon (2012), *Du mode d'existence des objets techniques*, Editions Aubier.

C. – C. Soulages, « Exposition Internationale d'Electricité : Galerie des machines : Alliance, Wilde, de Méritens », *La Lumière Electrique*, Volume 6, n°1-25, 1882, p515 à 518.

C.-C. Soulages, « Exposition International d'Electricité. Les salles de l'exposition Edison », *La Lumière Electrique*, Volume 6, n°3, 21 janvier 1882, p61-62.

Frank J. Sprague, « Application of Electricity to Street Railways », *Proceedings of the National Electric Light Association*, Février 1890.

William Stanley, « Alternate Current Motors », *Proceedings of the National Electric Light Association*, p171.

L. B. Stillwell, « Niagara Power », *Proceedings of the National Electric Light Association*, Juin 1897, p281 à 294.

## T

Gabriel Tarde (1895), *Les lois de l'imitation*, Paris : Félix Alcan.

Section « Etats-Unis », « Le moteur à courants alternatifs de N. Tesla », *La Lumière Electrique*, Volume 29, n°28, 14 juillet 1888, p87.

Nikola Tesla, « Sur les phénomènes de vibration à haute fréquence », *La Lumière Electrique*, Volume 49, n°32, 12 août 1893, p287 à 296 ; n°33, 19 août 1893, p338 à 346.

Nikola Tesla, « Some Personal Recollections », *Scientific American*, 5 juin 1915, <http://www.tfcbooks.com/tesla/1915-06-05.htm>

Nikola Tesla, "My inventions", *Electrical Experimenter*, February-June and October 1919.  
Source : <http://www.tfcbooks.com/tesla/1919-00-00.htm#IV>. The Discovery of the Tesla Coil and Transformer

Silvanus P. Thompson (1886), *Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques*, Paris : Baudry.

Albert Turpain, « Sur les chemins de la découverte. L'œuvre de Nicolas Tesla », *La Nature*, 1939, 1<sup>er</sup> semestre, p163.

## V

M. de Valbreuze, « L'électrification des chemins de fer », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1911, 1<sup>er</sup> semestre, p317.

Edouard Vasseur, « Pourquoi organiser des Expositions universelles ? Le « succès » de l'Exposition universelle de 1867 », *Histoire, économie & société*, 2005/4 24<sup>e</sup> année, p573-594.

François Vatin (1993), *Le travail. Economie et physique (1780-1830)*. Paris : Puf.

François Vatin (2002), « La morale utilitaire de Jules Dupuit » in Jean-Pascal Simonin et François Vatin (éd.), *L'Œuvre multiple de Jules Dupuit. Calcul d'ingénieur, analyse économique et pensée sociale*, Angers : Presses universitaires d'Angers, p91-116.

François Vatin, « Mauss et la technologie », *Revue du MAUSS*, 2004/1 (no 23), p.418-433.

François Vatin (2012), *L'espérance-Monde*, Editions Albin Michel.

François Vatin, « Le produit de la nature et le temps des hommes : Don, service et rendement », *Revue du MAUSS* 2013/2 (n° 42), p. 221-245.

H. Vigneron, « Nécrologie d'Elihu Thomson », *La Nature*, 1937, 1<sup>er</sup> semestre, p480.

Henry Vivarez (1901), *Les phénomènes électriques et leurs applications : étude historique, technique et économique des transformations de l'énergie électrique*, Paris : G. Carré et C. Naud.

Herbert Wagner, "General Distribution from Central Stations by Alternating Currents", *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1898, p135.

Léon Walras, « L'Etat et les chemins de fer. Mémoire composé en 1875 », *Revue du Droit public et de la Science politique*, Mai – juin et juillet – août 1897, [http://www.taieb.net/auteurs/Walras/etat\\_cdf.html#01](http://www.taieb.net/auteurs/Walras/etat_cdf.html#01)

Langdon Winner, "Upon opening the blackbox and finding it empty: social constructivism and the philosophy of technology", *Science, Technology and Human Values*, Volume 18, N°3 (Summer, 1993), pp362-378.

Arthur Wright, "Profitable Extensions of Electricity Supply Stations", *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1897, p186.

Arthur Wright, "Profitable Extensions of Electricity Supply Stations", *Proceedings of the National Electric Light Association*, 1897, p161.

Valery Yakubovich, Mark Granovetter et Patrick McGuire, "Electric charges: the social construction of rate systems", *Theory and Society* (2005) 34: 579–612.

Adolphe Zimmern (1910), *Les courants de haute fréquence et la d'Arsonvalisation*, Paris : J.-B. Baillière et fils.

## *Divers*

« Machine électro-magnétique Gramme », *Revue Industrielle*, 1871, p406.

« Petits moteurs industriels », *Revue Industrielle*, 1871, p195.

« Machine magnéto-électrique Gramme appliquée à la production de lumière », *Revue Industrielle*, mars 1873.

« Machine dynamo-électrique de M. Weston », *La Lumière Electrique*, Volume 1, n°9, 1er novembre 1879, p172-173.

« Rendement économique des moteurs électriques », *La Lumière Electrique*, Volume 2, n°8, 15 avril 1880, p159-160.

*Imprimés de la délégation d'Alsace- Lorraine. VIe-IXe session, 1879-1882. 15<sup>ème</sup> séance, vendredi 28 janvier 1881, 3 heures de l'après-midi, Landesausschuss d'Alsace-Lorraine, VIIIe session.*

Ministère des Postes et Télégraphes, *Congrès international des électriciens. Comptes rendus des travaux*, 1881, Paris : G. Masson.

Rapport présenté par le Conseil d'administration à l'Assemblée générale des Actionnaires de la Société Electrique Edison sur l'exercice 1882.

« Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 17, n°32, 8 août 1885, p285.

« Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 27, n°7, 18 février 1888, p348.

« Chronique : Utilisation de la force motrice de l'eau pour l'éclairage électrique », *La Lumière Electrique*, Volume 19, n°4, 23 janvier 1886, p180.

« La lumière électrique chez soi. - Petites nouvelles », *Journal des usines à gaz*, n°112, 20 avril 1886, p136-137.

« Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 20, n°21, 22 mai 1886, p380.

« La station centrale de Bourganeuf », *Journal des usines à gaz*, n°115, 5 juin 1886, p182.

« Chronique », *Revue Industrielle*, 12 août 1886, p328.

« Transmission de la force électrique entre Paris et Creil », *Revue Industrielle*, 26 août 1886, p349-350.

*Journal des usines à gaz*, n°121, 5 septembre 1886, p274.

« Rapport sur les expériences de M. Marcel Deprez relatives au transport de la force entre Creil et Paris », *La Lumière Electrique*, Volume 22, n°52, 25 décembre 1886, p577 à 592.

*Journal des usines à gaz*, n°121, 5 septembre 1886.

« Expériences de transport de force au moyen de machines dynamo-électriques couplées en série », *Revue industrielle*, 4 novembre 1886, p442.

« Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 27, n°7, 18 février 1888, p348.

Correspondances spéciales de l'étranger, *La Lumière Electrique*, Volume 29, n°33, 18 août 1888, p339.

« Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 32, n°21, 25 mai 1889, p397.

France. Ministère du commerce, de l'industrie et des colonies (1892), « Exposition universelle internationale de 1889 à Paris. Rapport général, Tome septième. L'outillage et les procédés des industries mécaniques. L'électricité. Groupe VI », Paris : Imprimerie nationale, p303.

« Variétés : Adresse inaugurale sur la distribution de l'électricité », *La Lumière Electrique*, Volume 35, n°6, 8 février 1890, p294 à 296, p295.

« L'électricité au foyer domestique », Revue *La Femme*, 15 février 1891, n°4, p30.

« Statistiques sur le nombre de stations centrale électriques en France et aux Etats-Unis en 1893 », *La Lumière Electrique*, 1893, Volume 48, p98-99, p98.

« Faits divers », *La Lumière Electrique*, Volume 48, n°15, 15 avril 1893, p98-99, p98.

*Bulletin officiel de l'Exposition universelle, internationale et coloniale de Lyon en 1894*, 16 février 1893, p5.

*Journal des économistes*, 1894, Tome 19.

*Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1897, 96<sup>ème</sup> année, 5<sup>ème</sup> série, Tome 2, p567.

« Musée rétrospectif du groupe V. Electricité. Appareils, - Livres - Manuscrits - Autographes », Catalogue général de l'Exposition universelle de 1900.

Revue *La Nature*, 1901, 1<sup>er</sup> semestre, p184, p186 et p245.

*Le Génie civil : revue générale des industries françaises et étrangères*, 19 octobre 1901, p405.

« Utilisation de la chaleur perdue des fours à coke », *Comptes rendus de la Société des Ingénieurs Civils*, Octobre 1904, p526 à 529.

*Revue Olympique*, Mars 1906, p47.

*Bulletin - Société académique du Bas- Rhin pour le progrès des sciences, des lettres, des arts et de la vie économique*, 1913.

*Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 1928, p182.

