

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	9
Table des matières	13
Conventions et notations	17
Introduction	21
I L'éther dans les théories électromagnétiques de 1850 à 1900	41
1 Les débuts d'une science	43
1.1 Premières expériences	43
1.2 Les fondateurs de l'électromagnétisme	47
2 Maxwell, de l'hypothèse à la théorie	55
2.1 L'effet Faraday	55
2.2 On Faraday's Lines of Force	59
2.3 De l'analogie au modèle	61
2.4 <i>Exegi monumentum</i>	66
2.5 Maxwell et l'éther	74
3 Les Maxwelliens et la gestion de l'héritage	79
3.1 FitzGerald et la théorie de Maxwell	80
3.2 Changements radicaux	85
3.3 L'usine de Lodge	87

3.4	Heaviside : de la télégraphie aux équations	92
4	Vers un éther conceptuel	99
4.1	Le triomphe de Maxwell	99
4.2	Les dernières théories de l'éther	109
II L'éther et les théories électromagnétiques dans les formations pour ingénieurs		127
5	Des Champs Élysées à Grenoble : la mise en place des institutions de l'électricité en France	129
5.1	L'enseignement supérieur avant 1881	130
5.2	L'exposition internationale d'électricité	133
5.3	L'électricité industrielle : une dynamique globale, des vitesses variées	146
6	L'électromagnétisme à Polytechnique	155
6.1	La place de la physique dans l'enseignement	155
6.2	Contenu général des cours	160
6.3	De l'éther optique à l'éther électromagnétique ?	172
6.4	La difficile percée de l'électricité	183
7	Les écoles d'application se mettent à l'électricité	191
7.1	Un système bien rodé	191
7.2	L'arrivée de l'électricité	197
7.3	Le contenu des cours	201
7.4	Une position ambiguë	207
8	Les établissements civils et la diversité des enseignements	215
8.1	L'électricité ouvre de nouvelles voies	216
8.2	Les grandes écoles civiles	230
8.3	Dans les pas de Paul Janet : de la faculté de Grenoble aux instituts électro-techniques et à l'ESE	247

III La diffusion des théories électromagnétiques	261
9 Journaux, ouvrages et bulletins	263
9.1 La physique dans les journaux	264
9.2 Les revues électriciennes	276
9.3 La diffusion de la SIE	282
10 <i>La Lumière Électrique</i> : du journal technique aux articles de recherche	299
10.1 De la <i>Lumière</i> à l' <i>Éclairage</i>	299
10.2 Vers une revue théorique	306
10.3 Le journal <i>The Electrician</i> : un modèle outre-manche?	327
11 Poincaré et l'éther dans les théories électromagnétiques	337
11.1 Une figure de l'enseignement	338
11.2 L'éther de Maxwell vu par Poincaré	342
11.3 Les théories de Hertz et Lorentz par Poincaré	353
12 Alfred Liénard et sa contribution à l'électromagnétisme	367
12.1 Biographie	367
12.2 Publications théoriques	377
Conclusion	415
Annexes	425
Bibliographie	519
Index	558

Conventions et notations

Conventions générales :

- Les références bibliographiques sont au format auteur-date. La note de bas de page renvoie à la bibliographie en fin d'ouvrage. Les éventuelles abréviations utilisées sont explicitées dans la bibliographie.
- Pour les citations en exergue la note est placée à l'ouverture de la citation. Pour les paragraphes normaux, et pour les citations courtes, la note est placée à la fin du paragraphe. En cas d'ambiguïté, différentes notes peuvent être utilisées.
- Les termes étrangers sont signalés en italique.
- Toutes les citations sont traduites en français. La traduction est nôtre, sauf mention contraire explicite, et faite de façon littérale. Pour certains passages difficiles à traduire, la version originale est proposée en note.
- L'auteur d'une citation sera désigné par son nom, ou simplement par « l'auteur » pour éviter les répétitions.
- Les références croisées indiquent le chapitre et la section (ex : « voir 4.1 » renvoie au chapitre 4, section 1).
- Le système d'unités utilisé est le Système International (M.K.S.).

Notations mathématiques :

- Les vecteurs sont notés en gras.
- La norme d'un vecteur \mathbf{r} est notée $\|\mathbf{r}\|$.
- Le produit scalaire de deux vecteurs \mathbf{A} et \mathbf{B} est noté $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$, le produit vectoriel $\mathbf{A} \wedge \mathbf{B}$.

- L'opérateur vectoriel de gradient est noté ∇ . Pour un scalaire a le gradient est noté ∇a et pour un vecteur \mathbf{A} , la divergence est notée $\nabla \cdot \mathbf{A}$ et le rotationnel $\nabla \wedge \mathbf{A}$.
- L'opérateur dérivée partielle par rapport au temps est noté $\frac{\partial}{\partial t}$. La dérivée convective est notée $\frac{D}{Dt}$. La notation $\frac{d}{dt}$ est ponctuellement utilisée et explicitée.
- $d\mathbf{l}$ désigne un élément infinitésimal de longueur, $d\mathbf{S}$ un élément infinitésimal de surface (orienté) et dV un élément infinitésimal de volume. Le domaine d'intégration est précisé dans le texte ou avec les bornes de l'intégrale. Une intégrale sur un espace fermé (contour ou surface) est notée \oint .

Certaines notations sont régulièrement utilisées :

Grandeurs vectorielles

- \mathbf{A} est le potentiel vecteur.
- \mathbf{B} est l'induction magnétique (moderne : champ magnétique).
- \mathbf{D} est l'induction électrique.
- \mathbf{E} est la force électrique (moderne : champ électrique).
- \mathbf{H} est la force magnétique (moderne : excitation magnétique).
- \mathbf{j} est la densité volumique de courant.
- \mathbf{M} est l'aimantation.
- \mathbf{P} est la polarisation.
- $\mathbf{\Pi}$ est le vecteur de Poynting.
- \mathbf{r} est le vecteur position.
- \mathbf{v} est le vecteur vitesse.

Grandeurs scalaires

- c est la vitesse de la lumière et des perturbations électriques dans le vide.
- i est l'intensité du courant électrique.
- n est l'indice optique du milieu.

- q est la charge électrique.
- t, x, y, z sont les coordonnées respectivement de temps et d'espace.
- ϵ est la permittivité diélectrique.
- μ est la perméabilité magnétique.

Les notations des autres grandeurs peuvent varier selon les points abordés. Elles seront toujours précisées.

Rapport-Gratuit.com

Introduction générale

Avant de choisir ce sujet de thèse, ma réflexion a commencé par s'articuler autour de deux questionnements. Le premier est « comment ». Comment les « équations de Maxwell » ont-elles été trouvées ? Comment les entités que sont les champs électriques et magnétiques ont-elles été introduites en physique ? Comment, enfin, la théorie électromagnétique a-t-elle été construite ? Le second mot serait « pourquoi ». Plus particulièrement, une question me frappait : pourquoi l'éther, le milieu de propagation si important dans la physique du XIXe siècle, notamment pour l'optique, a-t-il totalement disparu de l'enseignement des équations de Maxwell ? Ces questions furent pour moi le point de départ de la réflexion.

Le rôle de l'éther

Mais commençons par définir ce que nous entendons exactement par « éther ». Concept existant depuis l'Antiquité, l'éther désigne dans la physique d'Aristote (IVe siècle avant J.-C.) l'unique élément constitutif du monde supra-lunaire, par opposition aux quatre éléments présents sur Terre (terre, eau, feu et air). Il est de nature différente de ces quatre éléments du monde sublunaire : par exemple, l'éther ne peut pas se transformer, mais uniquement se déplacer localement, selon le mouvement propre du monde supra-lunaire, le mouvement circulaire perpétuel. Il est également responsable de la lumière et de la chaleur des astres, « en se frottant au feu, il enflamme celui-ci pour créer la chaleur et la lumière ». Platon (Ve-IVe siècle avant J.-C.), dans son *Cratylus*, fait dériver le mot même ($\alpha\iota\theta\eta\rho$ = aether) de cette idée de mouvement ($\alpha\epsilon\iota\theta\epsilon\iota$ = je cours).¹

Le terme d'*éther* persiste jusqu'au XVIIe siècle, où il apparaît dans les travaux de plusieurs auteurs, en particulier chez Descartes (1596-1650). Dans son ouvrage *Le monde*, Descartes décrit une cosmogonie basée sur trois éléments. Le deuxième élément, apparu initialement,

1. Cantor et Hodge 1981, p. 5 ; Maxwell 1878, p. 763. L'autre étymologie possible fait référence au feu des astres, $\alpha\iota\theta\omega$ = je brûle.

est constitué de sphères minuscules. Le premier élément, qui constitue notamment le Soleil, et le troisième élément, qui constitue la matière ordinaire, sont eux mêmes créés à partir de ce deuxième élément qui représente la « matière subtile » transmettant notamment la lumière, comme une pression.²

L'éther apparaît également chez Newton (1642-1727), à plusieurs reprises dans ses différents travaux (notamment dans les « Queries » de son *Optique*), et bien qu'il ne cherche pas vraiment à décrire la nature même de cet objet. Certaines caractéristiques reviennent pourtant : l'éther de Newton est, comme chez Descartes, constitué de particules minuscules ; ces particules se repoussent entre elles, et repoussent également la matière ordinaire. L'éther est similaire à l'air, mais « plus rare, plus subtil, et plus fortement élastique ». Les particules d'éther agissent donc entre elles par des actions à distance, contrairement à l'éther de Descartes qui est un éther plein, d'actions de contact. La gravitation de Newton peut s'expliquer par un gradient d'éther, plus dense loin des corps, et qui exerce donc une répulsion dirigée vers le corps attractif.³

Avec les expériences d'interférences de Thomas Young (1773-1829) en 1801, puis la théorie ondulatoire de la lumière d'Augustin Fresnel (1788-1827) à partir de 1815, la nécessité d'un milieu intermédiaire pour la lumière semble incontournable. Des premiers modèles tentent d'expliquer la propagation de la lumière, comme celui de Fresnel qui représente l'éther constitué de couches parallèles de particules agissant entre elles par des forces à distance (voir Annexe n° 2). Le déplacement successif des couches permet de décrire le caractère transverse de la lumière, et d'expliquer notamment les expériences de polarisation d'Étienne-Louis Malus (1775-1812) de 1810. Dans les années 1830, Augustin Louis Cauchy (1789-1857) tire des travaux de Fresnel une description dynamique des particules de l'éther, avec une équation du mouvement.⁴

C'est à partir des années 1840 que la trajectoire de l'éther se rapproche grandement de celle de l'électromagnétisme. Peignons à grands traits la construction de cette théorie, qui décrit ce qu'on appelle aujourd'hui l'électromagnétisme classique.⁵ Avant les années 1840, les actions électriques et magnétiques sont considérées comme étant des actions à distance. Cette loi, élevée au rang de dogme par la physique laplacienne du début du XIXe siècle en France, se base sur la loi newtonienne de la gravitation universelle, sur laquelle la loi de

2. Cantor et Hodge 1981, p. 11-2. La nature de ce que Descartes nomme « matière subtile » varie selon ses ouvrages. Dans ses *Principes de la philosophie* elle désigne le deuxième élément pénétré du premier.

3. *Ibid.*, p. 19-21.

4. Buchwald 1981, p. 223 ; Darrigol 2012, p. 166-224.

5. Par opposition à l'électromagnétisme quantique, souvent désigné par son acronyme anglo-saxon QED : Quantum ElectroDynamics.

Coulomb de l'électrostatique a notamment été calquée. Les actions électriques et magnétiques ne peuvent exister qu'en présence de deux corps, et sont instantanées. Ces actions à distance sont d'ailleurs celles qui agissent sur les particules même des éthers optiques de Fresnel ou de Cauchy.

Le premier physicien à faire intervenir le milieu intermédiaire dans le raisonnement est l'anglais Michael Faraday (1791-1867), expérimentateur surdoué qui s'intéresse aux phénomènes magnétiques. Ses idées novatrices sont ensuite « traduites » mathématiquement par l'écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) dans les années 1860, qui détermine les relations entre différentes quantités : force électrique, force magnétique, courant électrique..., toutes ces quantités agissant au travers d'un milieu intermédiaire, élément central de la théorie comme siège de l'énergie. De sa théorie, Maxwell pose l'identité de ce milieu intermédiaire et de l'éther lumineux. L'éther est présent dans la plupart des théories britanniques, mais sa nature peut différer : alors que l'éther initial de Maxwell est un fluide, d'autres théories, comme celles de William Thomson (1824-1907, futur Lord Kelvin), considèrent l'éther comme un solide élastique.

La théorie de Maxwell est perpétuée par quelques physiciens britanniques, qui développent ses idées et ses méthodes. Mais c'est en Allemagne qu'elle reçoit une preuve éclatante, avec les expériences de Heinrich Hertz (1857-1894) en 1888 qui prouvent l'existence des ondes électromagnétiques prédites par Maxwell. À partir de cette année-là, la théorie de Maxwell devient dominante, et plusieurs auteurs prennent les idées de l'écossais comme point de départ. C'est notamment le cas de Hertz lui-même, qui construit une théorie attribuant aux forces électrique et magnétique le rôle central, puis de Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), qui franchit un pas important en attribuant la charge électrique à des particules de matière libres de se déplacer par rapport à l'éther. La construction de ces théories successives se fait très rapidement, et occupe à quelques années près la seconde moitié du XIXe siècle.

Au fil de ces théories, le rôle et la nature même de l'éther sont largement modifiés, de la même façon que l'éther électromagnétique est aussi bien différent de l'éther optique de Fresnel, ou de l'éther gravitationnel de Newton. Maxwell lui-même reconnaît que plusieurs éthers ont été introduits dans les théories de la physique. Dans l'article « Éther » qu'il rédige en 1878 pour l'*Encyclopedia Britannica*, il détaille les utilisations de l'« éther », qu'il décline au pluriel : « Les éthers furent inventés pour que les planètes s'y déplacent, pour constituer les atmosphères électriques et les effluves magnétiques, pour transmettre les sensations de part et d'autre de notre corps, et ainsi de suite, de telle sorte que l'espace a été empli entièrement

trois ou quatre fois d'éthers ». ⁶ Mais alors quel sens donner à l'« éther », puisque ce terme recouvre, au gré des époques et des physiciens, des objets qui semblent si différents, ou tout du moins occupent des fonctions si différentes ?

Nous prendrons comme définition de départ celle donnée par l'historien des sciences John Heilbron : les éthers sont « des substances subtiles qui transmettent les interactions entre les corps ordinaires. *Subtiles* signifie ténues ou rares, hautement pénétrantes, et indétectables directement par les sens. *Transmission* signifie la capacité de propager une action ou le potentiel d'une action sans se déplacer dans l'ensemble ». ⁷ Soulignons bien que ces substances peuvent transmettre l'action en elle-même, mais également le potentiel de l'action.

La croissance de l'électricité

Au cours de la seconde moitié du XIXe siècle, on assiste parallèlement à l'émergence de l'électricité au niveau industriel. Quittant le statut de curiosité de laboratoire, ⁸ elle devient un outil incontournable dans les procédés techniques grâce à la mise à disposition de générateurs de puissance (machines de la compagnie l'Alliance, machine de Gramme en 1869, etc.). Plusieurs domaines sont ainsi concernés : éclairage public — l'avenue de l'Opéra à Paris est en 1878 la première avenue éclairée à l'électricité — et multiplication des types de lampes (bougie Jablochhoff à arc en 1876, lampe Edison à incandescence en 1881, etc.) ; transmission de puissance avec le développement des transformateurs au début des années 1880 permettant de s'affranchir du lieu de production de l'électricité (controverse Marcel Deprez - Lucien Gaulard sur l'utilisation du courant continu ou alternatif pour la transmission de puissance) ; transports, avec les premiers tramways électriques, etc. ⁹

De plus, le télégraphe, déjà utilisé depuis son développement par Charles Wheastone dans les années 1830, est étendu avec la pose de câbles sous-marins. Le premier câble transatlantique fonctionnel est posé dès 1858 entre l'Irlande et le Canada (bien qu'il rompe quelques semaines plus tard à cause d'une surtension). Certains grands noms de la science britannique participent au développement de cette télégraphie sous-marine, comme William Thomson qui, par ses calculs sur la transmission télégraphique, permet l'établissement d'un autre câble transatlantique en 1865. ¹⁰ Le téléphone enfin, pour lequel Elisha Gray et Graham Bell dé-

6. Maxwell 1878, p. 1. Maxwell fait ici référence à l'éther optique, l'éther électrique et magnétique, et l'éther transmettant la chaleur.

7. Heilbron 1981, p. 187.

8. Birck et Grelon 2006, p. 11.

9. Les dispositifs cités ici sont détaillés en annexe (voir Annexe n° 8).

10. Bart 2008. Thomson montre la nécessité d'augmenter le diamètre du câble de transmission pour sup-

posent tous deux un brevet en 1876, s'ajoute à la liste des inventions basées sur l'électricité.¹¹

De la même façon que nous avons défini l'éther, il nous paraît nécessaire de préciser la nature de l'« électricité ». Cette nature n'est pas évidente, et nous verrons que certains auteurs de l'époque posent directement la question : « qu'est-ce que l'électricité ? ».¹² Dans son ouvrage principal, le *Treatise on Electricity and Magnetism*, Maxwell utilise le terme *electricity*, mais d'une façon trop floue qui perdra beaucoup de ses lecteurs. L'« électricité » doit-elle désigner le *fluide* électrique, la *charge* électrique, la *force* électrique, ou encore les *ondes* électromagnétiques. Autant de concepts qui voient eux-mêmes leur définition varier au gré des théories. Il nous semble préférable de n'adopter aucune de ces options, et de prendre le seul chemin cohérent : « l'électricité » n'existe pas. Du moins elle n'existe pas en tant qu'entité physique. Pour nous, elle désignera de façon générale le domaine d'application des phénomènes électriques. Nous parlerons ainsi du « domaine de l'électricité », de « l'industrie de l'électricité », ou même de « l'essor de l'électricité ». Mais nous prendrons garde à ne pas désigner par ce terme les différentes entités physiques intervenant dans les théories considérées.

Quelle place pour l'éther ?

En histoire des sciences, l'électromagnétisme a déjà été étudié dans une large mesure. Plusieurs auteurs ont traité de la construction des théories et des aspects expérimentaux (Buchwald, Darrigol, Hunt, Siegel, Whittaker, ...).¹³ À partir du début du XXe siècle, l'électromagnétisme classique ne subit plus de modifications majeures, et il est nécessaire de considérer l'histoire de la relativité et celle de la théorie quantique qui entrent en jeu. Quant à elle, l'histoire de l'électricité est nourrie, du côté de l'histoire des techniques, par les travaux de plusieurs auteurs (Beltran, Cardot, Caron, ...), histoire qui est régulièrement revue, tant la place de l'électricité évolue dans nos sociétés.¹⁴

Comme nous l'avons dit plus haut, de nombreux dispositifs sont développés pendant cette

porter les tensions utilisées.

11. Une controverse autour de la paternité du téléphone, notamment entre Elisha Gray et Graham Bell, demeure, mais nous garderons 1876 comme date de repère.

12. Voir Partie 3 les articles d'Édouard Hospitalier et Alexandre Stoletow notamment.

13. Voir Buchwald 1985, Darrigol 2000 et Whittaker 1910 pour des études générales ; Siegel 1991 sur la théorie de Maxwell ; Hunt 1991 sur la contribution des maxwelliens ; Buchwald 1994 sur les expériences de Hertz.

14. Sur l'histoire de l'électricité en général voir Beltran 2016, Cardot et Caron 1991. Alain Beltran souligne par exemple que le paysage électrique français a été largement remanié depuis les années 1990 (Beltran 2016, avant-propos).

période de la fin du XIXe siècle, souvent qualifiée de « seconde industrialisation », et portée notamment par l'utilisation de l'énergie électrique. Or tous les phénomènes électriques qui entrent en jeu dans les appareils (force magnétique, force électromotrice, induction magnétique, pertes par effet Joule ou par hystérésis, ...) sont expliqués par les théories qui se construisent au même moment. Doit-on parler de développement indépendant entre ces deux mouvements ? Ou ont-ils des liens importants ? La question de l'éther se pose particulièrement : élément central dans ces nouvelles théories électromagnétiques, il est l'archétype d'un objet théorique, qu'on ne peut ni détecter, ni décrire précisément. Face à la croissance de l'industrie, qui cherche avant tout des lois de fonctionnement compréhensibles par tous ses intervenants, l'éther semble bien éloigné des préoccupations premières.

C'est à cette interconnexion que se situe le point de départ de nos recherches. Pour établir la place de l'éther entre le domaine des théories électromagnétiques d'une part et celui de l'électricité industrielle d'autre part, nous considérons les moyens de formation pour tout un ensemble d'acteurs, ceux que nous avons nommés plus haut les « intervenants ». Peut-on préciser cette catégorie ? Elle regroupe à nos yeux tous ceux qui travaillent dans un domaine en lien avec la physique ou l'électricité et qui sont, au cours de leur formation et de leur carrière, en mesure de se former aux théories électromagnétiques. Nous verrons que cette condition pose nécessairement la question du niveau de connaissances, notamment en mathématiques et en physique.

Après avoir défini ces différentes notions qui seront récurrentes dans notre étude, nous pouvons formuler la question qui a guidé notre réflexion : Quelles sont les connaissances sur les théories électromagnétiques et sur l'éther transmises vers le secteur industriel, et par quels moyens ?

Pour apporter des réponses, nous avons organisé notre travail autour de trois axes d'étude. Donnons-en un bref aperçu. Le premier axe concerne la description de l'éther et du rôle qu'il joue au sein des théories électromagnétiques qui se succèdent dans la seconde moitié du XIXe siècle. Les deuxième et troisième axes abordent les différents canaux par lesquels une transmission de connaissance sur ces théories peut être faite. Il s'agit d'une part de détailler les formations dans les établissements d'enseignement, en particulier l'enseignement supérieur technique. Pour cela il est nécessaire de regarder le contenu des différents cours qui sont dispensés et les points traitant des théories qui nous intéressent. D'autre part, les journaux et revues constituent un autre moyen de diffusion, notamment pour les théories les plus récentes qui ne sont pas enseignées dans les écoles. Aux journaux scientifiques (généraux ou spécialisés), nous ajouterons également les ouvrages et les conférences.

L'une des difficultés que nous avons rencontrée est la prise en compte de nombreuses formations possibles au sein d'établissements très différents (Polytechnique, École Centrale, École Supérieure d'Électricité, instituts électrotechniques, ...). Mais cette approche transverse, si elle nécessite une prise en compte élargie des supports comme les cours, permet notamment une comparaison entre écoles particulièrement fructueuse tant les enseignements sont variés. Cette comparaison va d'ailleurs au-delà des contenus des cours : dans un contexte académique et social qui évolue rapidement, les plus récents de ces établissements réussissent à s'intégrer pleinement à la dynamique, alors que d'autres, plus anciens, y arrivent moins bien. Cet intérêt de la transversalité de notre approche se retrouve dans les supports de diffusion, qui offrent des lignes de publication très distinctes.

Nous avons déjà évoqué plus haut les nombreux travaux dont l'histoire de l'électromagnétisme a fait l'objet, de même que l'histoire de l'électricité. Les établissements que nous considérons ont déjà fait l'objet d'approches historiques sur leur création.¹⁵ L'histoire de l'enseignement des sciences et des techniques donne également une description des écoles d'ingénieurs et de la création des ingénieurs comme catégorie sociale, en France ou à l'étranger.¹⁶ Quelle est la place que nous avons souhaité donner à notre étude parmi tous ces travaux ? Au milieu de ces différentes voies, il nous a semblé qu'il y avait un chemin possible pour une approche reposant sur une étude approfondie des sources primaires (cours, articles de journaux, ...) pour mieux comprendre les connaissances autour d'un concept comme l'éther et qui sont transmises dans le domaine des applications. Nous ne chercherons d'ailleurs pas à définir un public de réception précis, et nous désignerons régulièrement les récipiendaires de ces informations comme « les élèves » dans le cas des écoles, ou « le lectorat » dans le cas des journaux.

Ainsi, nous avons regardé les cours pouvant aborder l'électromagnétisme, à savoir les cours de physique et ceux d'électricité, et nous nous sommes concentrés sur les parties abordant les points théoriques comme l'éther ou la description des phénomènes électriques ou magnétiques. Dans les cours d'électromagnétisme, la nature de la charge, les différentes hypothèses sur les forces, ont notamment retenu notre attention. En optique, nous avons également largement étudié la question de l'éther. À l'inverse, dans les cours généraux de physique, nous n'avons pas traité des parties abordant la thermodynamique ou l'acoustique.

La question est plus délicate dans le cas des machines électriques. De nombreux dispositifs

15. Voir : Belhoste 1989 pour Polytechnique, Birck et Grelon 2006 pour le CNAM, Guillet 1929 pour Centrale (Guillet est un ancien élève de l'école).

16. Guagnini et Fox 1993 : chap 1, pp. 1-40 pour l'Angleterre ; chap. 4 pour la Belgique ; chap. 2, pp. 42-62 et chap. 8 pp. 201-221 pour la France.

sont étudiés dans les cours d'électricité (machines électromécaniques comme la machine de Gramme, lignes télégraphiques, téléphones, lampes, ...). En pratique, les descriptions des appareils divers dans les cours d'électricité ne font aucune mention des théories, et n'utilisent que des notions d'électrocinétique comme la tension, l'intensité, la puissance ou la résistance. À aucun moment il n'est nécessaire d'introduire une conception particulière de la charge électrique ou du courant pour l'étude de ces machines. Ce n'est donc pas à travers ces études qu'un ingénieur peut obtenir des connaissances sur les théories électromagnétiques ou l'éther. Ces cours contiennent généralement un premier chapitre, souvent présenté comme un « rappel sur les lois théoriques de l'électricité », auquel nous nous sommes restreints.

Le même principe a été appliqué à la diffusion des théories électromagnétiques. Nous détaillerons plusieurs articles de journaux mettant en avant des points caractéristiques de ces théories. Nous considérerons des journaux de physique ou de science théorique (*Journal de Physique, Revue Générale des Sciences, La Nature, ...*) ainsi que des journaux tournés vers l'industrie et l'électricité (*La Lumière Électrique, L'Électricien, ...*). Les articles en question seront discutés par rapport au contexte de leur publication, notamment la ligne éditoriale du journal. Une approche centrée autour de certains acteurs principaux de cette diffusion permet de mieux considérer les liens entre le domaine de la physique et celui des revues techniques spécialisées dans l'électricité.

La volonté d'une approche transverse, étudiant de nombreuses sources primaires comme les cours ou les journaux, ouvre une multitude de voies. Il a donc fallu faire des choix sur le lieu et la période à prendre en compte. Sur le premier tout d'abord, nous regarderons presque exclusivement l'évolution en France. D'une part, la France (notamment l'État) organise la première Exposition Internationale d'Électricité en 1881, ce qui entraîne la création dans la foulée de la Société Internationale des Électriciens. D'autre part, à l'intérieur même des frontières, il existe une séparation nette entre le cercle des écoles parisiennes, très ancrées sur leurs positions, et les différents centres qui se développent en province, notamment à Lille ou à Grenoble, et qui poussent en faveur d'un enseignement moderne de l'électricité. Cette disparité donne lieu à des comparaisons particulièrement intéressantes. Si notre propos restera centré sur la France, nous pourrions être amenés à comparer certains points spécifiques avec d'autres pays, comme la Grande-Bretagne.

Nous ne souhaitons pas donner de date initiale précise à notre étude, car on ne peut considérer qu'un évènement particulier en marque le début de manière univoque. En ce qui concerne les théories, les travaux de Maxwell dans les années 1860 marquent un point de départ des théories de l'éther, mais ceux d'Ampère ou Faraday, plus anciens, sont nécessaires

à la compréhension de notre propos. En ce qui concerne l'électricité et le développement industriel, l'Exposition de 1881 représente bien sûr un point de repère majeur, mais nous devons également considérer des événements antérieurs, comme la création d'écoles ou de journaux dans les années 1870. Nous dirons simplement que l'essentiel de notre étude porte sur les vingt dernières années du XIXe siècle.

Cette limite postérieure de la fin du XIXe siècle n'est pas prise au hasard, elle correspond à plusieurs limites. Pour ce qui est des théories, nous ne rentrerons pas dans le domaine de la relativité, qui naît de la théorie de Lorentz des états correspondants, et de son introduction du temps local (au premier ordre en v/c en 1895 et à tout ordre en 1904).¹⁷ L'année 1900, que nous prendrons comme date limite pour notre étude, est l'année de publication d'un mémoire important du mathématicien et physicien Henri Poincaré, dans lequel il aborde notamment le rôle du champ dans les théories électromagnétiques, en lien avec les principes de la mécanique.¹⁸ D'un point de vue technique, l'année 1900 marque également le dépôt de brevet et les premières grandes démonstrations de transmission hertzienne de Guglielmo Marconi,¹⁹ et ouvre ainsi le domaine important de la télégraphie sans fil. Ce pan entier d'application de l'électromagnétisme nous a semblé trop large pour pouvoir l'intégrer à cette étude. Cette limite ne nous empêchera pas d'évoquer, ponctuellement, certains événements se déroulant dans les premières années du XXe siècle.

Notre travail est structuré en trois grandes parties, correspondants aux trois axes que nous avons introduits en réponse à notre problématique. La première, qui nous a semblé nécessaire à la bonne compréhension de la problématique, présente l'évolution des théories électromagnétiques de l'éther sur la seconde moitié du XIXe siècle. L'objectif est avant tout de décrire les différentes théories auxquelles nous ferons référence ensuite. Il s'agit notamment des théories successives de Maxwell, Hertz et Lorentz que nous avons rapidement évoquées plus haut, auxquelles nous pouvons ajouter les travaux antérieurs de Faraday, et ceux des maxwelliens. Ces théories présentent plusieurs grandes différences entre elles, tant sur les concepts de base que sur le traitement mathématique. Mais elles participent de ce que nous pouvons appeler la « dynastie maxwellienne ». À cette lignée, nous pouvons ajouter les contributions des physiciens William Thomson, et Joseph Larmor (1857-1942). Toutes ces théories s'inscrivent dans un ensemble plus large formant ce que nous désignerons dans la suite comme les « théories électromagnétiques de l'éther ».

17. Janssen 1995, Bracco et Provost 2006.

18. Poincaré 1900, Darrigol 2000 (a).

19. Voir Huth 1937.

Le premier chapitre constitue une introduction à cette étude, en donnant les grandes idées des théories sur les phénomènes électriques et magnétiques avant le XIXe siècle, notamment la théorie des fluides électriques à laquelle nous ferons régulièrement référence. Ce chapitre aborde également les deux grands physiciens qui sont à la base de l'électromagnétisme en tant que science. Le premier est André-Marie Ampère (1775-1836), physicien français qui a très largement étudié les interactions entre courants, et qui est considéré par Maxwell lui-même comme le « Newton de l'électricité ». Le second est Michael Faraday, qui prend une direction bien différente de celle d'Ampère, et qui place au centre de son raisonnement le rôle du « champ » électromagnétique.²⁰

Précisons ici les termes que nous emploierons : l'« électromagnétisme » désigne initialement les effets magnétiques créés par des courants électriques (et non par des aimants), son utilisation varie peu à peu pour englober tous les phénomènes liant électricité et magnétisme ; l'« électrodynamique » implique une notion de force, comme celle agissant entre deux éléments de courants, c'est un terme que nous emploierons moins souvent ; le « champ » électromagnétique représente l'espace (ou la région de l'espace) dans laquelle se produisent les phénomènes, et nous appellerons « forces » électrique ou magnétique les quantités vectorielles désignées aujourd'hui par \mathbf{E} et \mathbf{B} ; enfin, nous utiliserons le terme d'« ondes » électromagnétiques surtout à partir de 1888 et les expériences de Hertz, jusque là nous préférons « perturbations » électriques ou magnétiques pour décrire l'idée de transmission.²¹

Le deuxième chapitre est centré sur la contribution de Maxwell, qui bâtit une véritable théorie en partant des idées de Faraday. Dans ses premiers travaux, il utilise largement les analogies pour illustrer ses idées sur les phénomènes, et décrit un modèle mécanique susceptible de représenter la propagation des perturbations électriques (Maxwell emploie aussi le terme d'« induction » électrique, nous précisons le cas échéant). Ce modèle lui permet de déterminer plusieurs relations entre les grandeurs électriques et magnétiques, qui deviendront les « équations de Maxwell ». Par la suite, Maxwell construit un véritable raisonnement dynamique, basé sur les principes de la physique, en particulier la conservation de l'énergie. Bien que les idées originales soient de Faraday, c'est Maxwell qui fonde véritablement la théorie électromagnétique du champ.²²

20. Sur l'électricité avant le XIXe siècle voir Heilbron 1979, Heilbron 1982. Les travaux de Symmer sont détaillés dans Heilbron 1976. Sur la conception de la charge et du champ électrique avant Faraday voir Heilbron 1981. Sur les conceptions d'Ampère et de Faraday voir Darrigol 2000 (b), chap. 1 pp. 1-41.

21. Dans ses premiers mémoires, Maxwell parle de « perturbation » ou d'« induction » électrique. Dans son *Treatise* de 1873, il mentionne bien l'existence d'« ondes » électromagnétiques. Mais en France, ce terme se recoupe avec le concept d'« ondulations » de l'éther, qui renvoie parfois au mouvement de l'éther dans la théorie optique.

22. Sur les travaux de Maxwell en général voir Darrigol 2000 (b), pp. 137-73. Sur le mémoire de 1861 voir

Les travaux de ce dernier inspirent plusieurs de ses contemporains. Ces physiciens britanniques, qui reprennent ses idées tout en assimilant ses méthodes, font l'objet du troisième chapitre. Francis G. FitzGerald (1851-1901), Oliver Lodge (1851-1940) et Oliver Heaviside (1850-1925), sont ceux que nous nommerons les « Maxwelliens », reprenant l'expression de l'historien des sciences Bruce Hunt. Leur but est double : compléter la théorie de Maxwell, tout en cherchant à la diffuser auprès de leurs pairs. L'utilisation des modèles, chère à leur aîné, devient un leitmotiv, même si elle est parfois critiquée par leurs contemporains car jugée abusive.²³

La considération des travaux de Maxwell et des maxwelliens ne peut se faire de façon complète sans évoquer une grande figure — si ce n'est la plus grande — de la physique britannique du XIXe siècle : William Thomson. Celui qui deviendra Lord Kelvin en 1892 (il sera anobli tant pour ses travaux que pour ses positions politiques) a laissé une empreinte indélébile sur tous les domaines de la physique : optique, électromagnétisme, thermodynamique, mécanique des fluides.²⁴ Partisan d'une description mécaniste de l'électromagnétisme, basée uniquement sur les mouvements de la matière, c'est lui qui inspire Maxwell à ses débuts. Thomson est ensuite souvent en confrontation avec celui-ci, puis avec les maxwelliens, notamment sur la nature de l'éther. Nous ne lui attribuons pas de chapitre à part entière, car il ne rentre pas dans la « dynastie maxwellienne » mais nous ferons régulièrement référence à ses travaux.

Le quatrième et dernier chapitre de cette première partie réunit les principales avancées, expérimentales et théoriques, en lien avec Maxwell à la fin du XIXe siècle. Les expériences réalisées en 1887 et 1888 par Heinrich Hertz représentent une preuve déterminante en faveur de la théorie de Maxwell. Hertz construit également sa propre théorie, partant des équations de Maxwell mais remettant en cause certains concepts qu'il juge alors trop flous. Il place au centre de son raisonnement les forces électrique et magnétique. Les travaux de Hertz ne peuvent se comprendre sans faire référence à l'influence de son mentor, Hermann von Helmholtz, et donner les grandes lignes de sa théorie. Très différente de celle de Maxwell, et

Siegel 1991. Sur le cadre général de la physique victorienne et les liens entre Maxwell et Thomson voir Cantor et Hodge 1981, chap. 8.

23. Sur les biographies et travaux des Maxwelliens voir Hunt 1991, dont nous reprenons le titre. Voir également Darrigol 2000 (b) pp. 177-206. pour les commentaires sur les différents modèles.

24. Sur le rôle politique de Thomson voir : Hutchison 2009. Nous détaillerons plusieurs travaux de Kelvin en optique et électromagnétisme par la suite, à titre d'exemple dans d'autres domaines de la physique : l'unité de la température dans le Système International est le Kelvin ; le théorème de Kelvin désigne, en hydrodynamique, la conservation de la circulation de la vitesse dans un écoulement ; l'instabilité de Kelvin-Helmholtz explique la formation de vagues par un vent parallèle à la surface de l'eau (voir Guyon 2012, p. 295 et p. 596).

absolument pas basée sur un milieu de propagation, la théorie de Helmholtz fera simplement l'objet de précisions sur ses principaux résultats.²⁵

Un autre pas conceptuel important est franchi par le physicien hollandais Hendrik Lorentz, qui attribue à la matière la charge électrique. Cette théorie lui permet d'expliquer certains phénomènes optiques, comme l'entraînement partiel de l'éther (qui traduit la formule d'entraînement de Fresnel), jusqu'ici resté inexplicables. Une dernière théorie que nous aborderons est celle due au physicien irlandais Joseph Larmor. Si elle n'est pas en lien direct avec celle de Maxwell, elle place l'éther au centre du raisonnement, en cherchant à créer un véritable mécanisme de propagation. Mais les résultats expérimentaux, contredisant la théorie, poussent Larmor à donner de l'éther une vision différente d'un support purement réel, en lui attribuant une nature « transcendentale », descriptible avant tout par les équations.²⁶

Comme nous l'avons signalé plus haut, l'étude des théories électromagnétiques a déjà fait l'objet de plusieurs ouvrages de référence, et elle ne représente pas le cœur de notre travail. Par conséquent nous ne chercherons pas à détailler toutes les théories en lien avec la notion d'éther, mais uniquement celles dont nous aurons besoin dans les deux parties suivantes. Pour présenter l'enchaînement de ces théories de manière plus personnelle, nous avons choisi de garder comme élément conducteur la vision de l'éther qui en ressort, ainsi que celle qui est attribuée à la charge électrique.

Notre deuxième partie aborde la formation dispensée dans les établissements d'enseignement supérieur technique. Elle a pour but de déterminer les connaissances qu'un élève ou un étudiant possède en sortant de son établissement. Nous disons « établissement » de manière générale et non simplement « école », car nous considérons également le cas des universités, des instituts électrotechniques et celui, plus particulier, du Conservatoire des Arts et Métiers.

Cette partie débute par une mise en place du paysage académique français de l'électricité à la fin du XIXe siècle. Afin de pouvoir discuter les orientations des différentes écoles il nous a paru indispensable d'expliquer leur création et le cadre dans lequel elles s'inscrivent. Par exemple, l'École Polytechnique créée en 1794, et l'École Supérieure d'Électricité plus jeune d'un siècle ne peuvent raisonnablement être considérées de la même façon. Pour relier ces établissements entre eux et à la dynamique industrielle autour de l'électricité, nous organisons notre propos autour d'un élément central : l'Exposition Internationale d'Électricité de 1881

25. Sur les expériences de Hertz voir Buchwald 1994 et Darrigol 2000 (b), pp. 206-63.

26. Sur les travaux de Lorentz et Larmor voir Darrigol 2000 (b), pp. 322-41. Sur les liens entre les travaux de Lorentz et la relativité (notamment le théorème des états correspondants) voir Janssen 1995. Sur les expériences de Lodge et les interprétations de Larmor voir Hunt 1986.

à Paris. En même temps que cette exposition se déroule le Congrès des électriciens, où se retrouvent physiciens, industriels et professeurs des plus grandes écoles. La question d'une normalisation des unités relatives à l'électricité, unités jusqu'alors propres à chaque pays, est le principal point abordé. Ces deux événements sont à la fois le symbole de la montée en puissance de l'électricité et celui d'une organisation académique. Ils entraîneront de plus la création de la première société savante autour de l'électricité, la Société Internationale des Électriciens dès 1883.

Pour ce premier chapitre nous avons principalement utilisé trois types de sources : tout d'abord les références sur l'histoire de l'électricité déjà mentionnées plus haut ;²⁷ ensuite les travaux traitant de la constitution, à la fin du XIXe siècle, d'une véritable classe sociale des ingénieurs, autour de cette industrialisation, particulièrement ceux d'André Grelon et de Robert Fox ;²⁸ enfin, les études de Bruno Belhoste sur l'histoire de Polytechnique et de ses écoles d'applications.²⁹ Ces analyses sont complétées par endroits par des extraits de sources primaires que nous avons souhaité intégrer.

Les trois chapitres suivants s'intéressent plus particulièrement à l'étude des cours. Le deuxième et le troisième chapitres traitent de ce que nous appelons le « système polytechnicien », constitué de l'École Polytechnique et de ses écoles d'applications. Il représente le parcours classique d'un futur ingénieur des corps de l'État. L'École Polytechnique, qui fait l'objet du deuxième chapitre, tient une place prédominante dans le paysage académique français de par son ancienneté et son prestige lié aux grands noms de physiciens et mathématiciens qui y ont été formés, comme André-Marie Ampère, Augustin Fresnel ou Augustin-Louis Cauchy. L'objectif y est avant tout de donner aux futurs ingénieurs une base théorique dans les domaines scientifiques. Ce statut s'accompagne de programmes d'enseignement particulièrement favorables aux concepts de la physique française du début du XIXe siècle, et possède une certaine inertie face aux changements rapides du monde industriel.

Les écoles d'applications, comme l'École des Mines, l'École des Ponts et Chaussées ou l'École du Génie Maritime, sont abordées dans le troisième chapitre. L'enseignement qui y est donné est résolument orienté vers la pratique, pour compléter celui de Polytechnique. Les professeurs sont eux-mêmes issus de ce système et reviennent enseigner dans l'école qui les a formés. Ils doivent alors tenir compte des notions utilisées dans la pratique, qui entrent souvent en conflit avec les notions presque ancestrales qu'ils connaissent. Ainsi, dans les

27. De manière générale : Beltran 2016, Cardot et Caron 1991. Sur l'exposition de 1881 : Cardot et Caron 1991, partie 1, chap. 1, Beltran 2016, pp. 53-67, Ramunni 1995, chap. 1.

28. Grelon 1991, Grelon 1993, Fox et Guagnini 1993.

29. Belhoste 1989.

cours d'électricité, les lignes de force de Faraday doivent cohabiter avec les actions à distance chères aux physiciens français. Cette prise en compte ne suffit parfois pas, et le système entier prend peu à peu conscience de son retard dans le domaine de l'électricité par rapport aux connaissances nécessaires à la pratique.

Enfin, le quatrième chapitre de cette partie étudie les cours donnés dans plusieurs établissements qui proposent des formations en physique ou en électricité. Il serait difficile de parler d'un « ensemble », tant ces établissements sont disparates. Mais une étude attentive permet de montrer plusieurs groupes au sein de cette disparité. Certains établissements, comme l'École Municipale de Physique et Chimie Industrielles (EMPCI) à Paris, naissent au moment de l'essor de l'électricité industrielle à partir des années 1880. Résolument tournés vers la formation de ceux qu'on pourrait qualifier comme des « techniciens supérieurs », ces établissements ne supportent pas le poids d'une tradition séculaire et proposent dès leurs débuts un enseignement qui intègre les idées récentes sur l'électromagnétisme comme celles de Maxwell. Face à ces nouveaux venus, des établissements plus anciens comme l'École Centrale ou le Conservatoire des Arts et Métiers se mettent peu à peu à l'électricité, qui arrive officiellement dans les programmes à la fin des années 1880. Cette création de nouvelles écoles ou de nouveaux enseignements est également portée par une nouvelle génération d'enseignants, à l'image de Paul Janet (1863-1937), que nous aborderons en détail. Cette génération, élevée au rythme de l'électricité, impose ses vues et contribue fortement à la création d'un enseignement technique au sein d'instituts universitaires électrotechniques qui voient le jour à la toute fin du siècle.

Ces trois chapitres sont presque intégralement construits à partir d'étude de sources primaires. Il s'agit principalement de cours et de différents documents administratifs (décrets, programmes d'enseignement, catalogues de bibliothèques, ...), dont la plupart ont été consultés auprès des écoles en question, soit physiquement en bibliothèque, soit via les bases d'archives numérisées. Certaines références à des ouvrages de littérature secondaire permettent de compléter notre propos. Dans l'ensemble, l'éther comme milieu de propagation pour la lumière est connu des élèves, mais les théories électromagnétiques et le rôle qu'y joue l'éther sont beaucoup moins connus. Un ingénieur formé dans le système polytechnicien avant 1890 n'aura peut-être pas même entendu parler de la théorie de Maxwell. À l'inverse, des élèves sortant d'autres écoles comme l'École Supérieure de Télégraphie ou l'EMPCI auront une vision assez précise de cette théorie et de la fonction de l'éther.

La troisième et dernière partie de notre travail s'intègre à notre idée de la diffusion des

connaissances par d'autres moyens. Ceux qui officient dans les domaines de la physique ou de l'électricité doivent pouvoir continuer à se former sur les diverses théories, notamment (qui ne sont pas enseignées dans les établissements, ou qui sont trop récentes) : professeurs de physique, médecins, ingénieurs civils ou militaires, etc.³⁰ Ils disposent pour cela de plusieurs vecteurs. Les revues scientifiques en sont le principal, qu'elles soient généralistes ou spécialisées dans l'électricité. Les ouvrages publiés par des physiciens ou des électriciens transmettent également des vues sur les différentes théories, et permettent en général d'approfondir les articles parus dans les journaux et revues. Enfin, les bulletins de sociétés savantes, ou les expositions organisées autour de l'électricité, sont l'occasion d'aborder certains sujet, à l'image de l'exposition organisée à l'Observatoire de Paris en mars 1885 sur laquelle nous avons souhaité dire un mot.

Le premier chapitre aborde les points que nous venons d'évoquer de manière générale. Nous considérons les principales revues scientifiques (comme le *Journal de Physique* ou la *Revue Générale de Sciences*), dans lesquelles de nombreux articles évoquent ces sujets. À l'inverse, des revues techniques comme le journal spécialisé *L'Électricien* ne donnent que très peu d'informations sur ces points théoriques. Par rapport à ces deux types de revues, les bulletins de sociétés, dont le *Bulletin de la Société Internationale des Électriciens* se tiennent à mi-chemin, en publiant ponctuellement certains articles théoriques mais qui restent clairement destinés à un lectorat d'électriciens disposant des connaissances de base dans le domaine.

Le deuxième chapitre se concentre sur un journal se détachant nettement des autres. Créée en 1879, la revue *La Lumière Électrique* se définit comme une revue d'électricité. Mais au gré de plusieurs influences, elle devient peu à peu une revue dans laquelle les articles techniques sur les dispositifs électriques côtoient des articles théoriques de niveau particulièrement élevé. Le journal représente ainsi un aspect important de l'essor de l'électricité, qui favorise le développement des recherches en électromagnétisme. Nous montrerons que ce changement de cap s'opère sous l'influence d'un homme en particulier, Henri Poincaré. Si le journal *La Lumière Électrique* représente une exception en France, il est d'ailleurs possible de lui trouver un journal en partie équivalent outre-Manche, avec la revue *The Electrician*, dans laquelle publie régulièrement Oliver Heaviside.

Les publications de Poincaré sur les théories électromagnétiques font l'objet du troisième chapitre de cette dernière partie. Il nous a fallu faire des choix dans l'agencement de notre travail, et certains furent difficiles. En particulier, la place de ce troisième chapitre, dans

30. Dans sa préface au *Journal de Physique* en 1872, le fondateur Charles d'Almeida parle des « hommes de toute profession scientifique ». Voir : *JdP* 1872, p. 5-6.

lequel nous présentons rapidement la carrière de Poincaré, par rapport au chapitre précédent, dans lequel nous mentionnons régulièrement le scientifique. Mais cette option nous semble la plus convaincante, et nous donnons dès maintenant quelques informations sur Poincaré, nécessaires à la compréhension des premières mentions. Ancien élève de Polytechnique (X 1873) et de l'École des Mines, Poincaré devient professeur titulaire à la Sorbonne en 1886. En 1887, il donne un cours sur la théorie de Maxwell qui est ensuite publié sous le titre *Électricité et Optique*, et suivi d'un second volume sur les théories de Helmholtz. Ces cours sont rédigés par des assistants, souvent préparateurs ou chargés de cours à l'université. Fin 1900, Poincaré publie une nouvelle édition du livre *Électricité et Optique* dans laquelle il traite en détail des théories de Hertz et de Lorentz (postérieures à ses premiers cours). Au même moment, il rédige un mémoire abondant des points importants sur le rôle du champ électromagnétique, mémoire évoqué précédemment et que nous détaillerons également.

Le dernier chapitre s'intéresse de façon plus poussée à un acteur bien spécifique, qui s'inscrit à la croisée de tous les courants que nous avons évoqués jusque-là. Alfred Liénard (1869-1958) commence sa carrière au début des années 1890. Passé par le même cursus académique que Poincaré, il enseigne des cours d'électricité à l'École des Mines de Saint-Étienne, effectue des missions en tant qu'ingénieur, et publie dans le journal *La Lumière Électrique* des articles de diffusion ainsi que des articles de recherche. Ce chapitre propose une biographie de Liénard ainsi qu'un commentaire critique de ses publications sur la période 1890-1900, dont celle portant sur les potentiels que l'on nomme potentiels de Liénard-Wiechert.

Pour un lecteur souhaitant se former aux théories électromagnétiques de l'éther, il y a ainsi plusieurs possibilités. Les journaux de physique publient des articles assez précis, mais qui nécessitent des pré-requis pour leur bonne compréhension. On retrouvera donc parmi leur lectorat des élèves passés par les grandes écoles et ayant acquis une formation poussée, notamment en mathématiques. Dans les journaux spécialisés sur l'électricité, on trouve des articles plus abordables pour un novice, mais ils demeurent vraiment ponctuels. Le journal *La Lumière Électrique* constitue une exception, en mettant en place une publication régulière d'articles permettant de se former aux nouvelles théories. Par son influence et ses écrits, Henri Poincaré est l'un des principaux acteurs de cette diffusion. De son côté, Alfred Liénard se distingue par sa contribution aux différents domaines que nous avons abordés : formation typique d'un ingénieur des corps de l'État, publications dans les journaux spécialisés, enseignement de l'électricité. Il publie des articles de diffusion ainsi que des articles de niveau plus théorique, mais toujours au sein du journal *La Lumière Électrique*.

Comme c'était le cas pour la deuxième partie consacrées aux écoles, cette dernière partie

sur la diffusion est presque intégralement basée sur des sources primaires. Les journaux ont été consultés via les archives numérisées ou en version papier dans différentes bibliothèques, de même que les bulletins de sociétés.³¹ L'exposition d'électricité de 1885 à l'Observatoire de Paris fait l'objet d'une description tirée des archives de l'Observatoire et du *Bulletin de la Société Internationale des Électriciens*. Les informations biographiques sur Alfred Liénard sont tirées de documents conservés aux Archives départementales de la Loire (pour les Mines de Saint-Étienne) et du Rhône (pour la faculté des sciences de Lyon).

À la fin du XIXe siècle, l'éther est un objet central dans les théories électromagnétiques. Pour un public français, au sein duquel les concepts pré-maxwelliens dûs à Coulomb et Ampère sont largement répandus, la compréhension de ces théories est délicate, et l'éther est source de questionnements ou d'incompréhensions. Afin de comprendre les notions sur l'éther qui sont diffusées, il est nécessaire de prendre en compte l'enseignement spécialisé en physique et en électricité, dispensé au sein d'établissements variés, mais également les ressources qui sont accessibles comme les journaux scientifique, les bulletins de sociétés et les ouvrages.

31. Pour les versions numérisées les supports sont principalement le site de la Bibliothèque Nationale de France Gallica, et le CNUM du Conservatoire des Arts et Métiers.

Première partie
L'éther dans les théories
électromagnétiques de 1850 à 1900

Introduction de la première partie

La théorie ondulatoire de la lumière, développée par Augustin Fresnel au début du XIX^e siècle, met en avant l'éther comme milieu de propagation de la lumière. Parallèlement au développement de cet éther « optique », des expériences sont menées dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, notamment l'expérience de Christian Ørsted mettant en évidence l'action magnétique d'un courant électrique. Ces expériences poussent le britannique Michael Faraday à reconsidérer la nature des phénomènes mis en jeu, en accordant une place primordiale à l'espace situé entre les conducteurs, espace désigné comme le « champ électromagnétique ».

Peu à peu, une théorie électromagnétique du champ émerge grâce aux travaux de James C. Maxwell, qui introduit un éther « électromagnétique », milieu propageant les forces électrique et magnétique. Maxwell identifie les deux éthers en tant que milieu matériel unique, en développant une théorie électromagnétique de la lumière. Ses travaux sont ensuite repris par plusieurs physiciens britanniques — les « maxwelliens » — qui développent ses idées, pour arriver progressivement à la théorie de Maxwell telle qu'elle est considérée aujourd'hui.

La théorie de Maxwell reçoit une preuve expérimentale fondatrice en Allemagne grâce aux travaux de Heinrich Hertz, qui montre en 1888 l'existence d'ondes électromagnétiques, prédites par le physicien britannique. Ces expériences donnent définitivement une importance majeure à la théorie de Maxwell, qui servira de base à plusieurs théories de l'éther de la fin du siècle. Hertz propose ainsi sa propre théorie, mettant en avant le concept de forces de champ. Le physicien néerlandais Hendrik Lorentz introduira une rupture conceptuelle importante en attribuant la propriété de la charge électrique à la matière, et non à l'éther. Cette rupture amène à reconsidérer la nature de l'éther, non plus comme un milieu matériel mais comme un référentiel.

Le chapitre 1 aborde les contributions des pionniers de l'électromagnétisme, avec l'expérience d'Ørsted, les travaux d'André-Marie Ampère et ceux de Faraday. Le chapitre 2 expose le développement des idées de Maxwell, qui introduit l'éther comme un milieu mécanique puis comme le siège des énergies électrique et magnétique. Le développement de ces idées par les maxwelliens fait l'objet du chapitre 3. Les expériences majeures de Hertz, d'Albert Michelson, et d'Oliver Lodge, ainsi que les dernières théories de l'éther sont exposées dans le chapitre 4.

In any brave and novel
project... perfection can only
be a pernicious dream.

Hasok Chang

Chapitre 1

Les débuts d'une science

En juillet 1820, le danois Hans Christian Ørsted, professeur de physique à Copenhague, met en évidence l'action magnétique exercée sur une aiguille aimantée par un fil parcouru par un courant électrique. Cette expérience marque le début du domaine de l'« électromagnétisme », à savoir l'étude des effets magnétiques obtenus par des moyens électriques, et vient ouvrir un pan entier de la physique. Mais c'est également la suite logique des découvertes du début du siècle.

Les différentes conceptions de l'« électricité » avant la découverte d'Ørsted, ainsi que l'expérience du Danois sont discutées dans la première partie. Dans la seconde partie, nous présentons ceux qui constituent à notre sens les deux fondateurs de l'électromagnétisme. Le Français André Marie Ampère et l'Anglais Michael Faraday, bien qu'ayant des conceptions opposées l'un de l'autre sur les phénomènes magnétiques, vont tous deux contribuer grandement à la formation d'un véritable domaine de recherches théoriques et expérimentales autour de l'électromagnétisme.

1.1 Premières expériences

Électricité et magnétisme jusqu'au XVIIIe siècle

La connaissance des phénomènes électriques est bien antérieure au XIXe siècle, et peut remonter jusqu'à l'Antiquité. Ainsi, l'ambre jaune ($\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$: *electron*), à laquelle l'« électricité » doit son nom, présentait la particularité de pouvoir attirer des objets légers lorsqu'elle était frottée avec un tissu. Au XVIe siècle, un médecin anglais, William Gilbert (1544-1603), est le premier à dénommer « électriques » les corps qui, comme l'ambre, détiennent le pouvoir

d'attirer certains autres corps après avoir été frottés.¹ Plus important encore, Gilbert marque une différence entre les corps « électriques » comme l'ambre, et les corps « magnétiques », comme la magnétite, une roche capable d'attirer le fer. Pour lui, l'électricité est une vapeur subtile relâchée par un corps électrique lors de la friction, et qui peut atteindre un corps voisin.²

Toujours en Angleterre, Francis Hauksbee (1660-1713) perfectionne les machines permettant « d'électriser » les corps, et multiplie les observations en utilisant des feuilles d'or ou d'argent. De son côté, Stephen Gray (1666-1736) découvre en 1729 l'électrification des métaux par influence. C'est le Français Charles-François Dufay (1698-1739) qui introduit l'hypothèse de deux électricités distinctes, en observant le comportement des corps chargés, en particulier les corps comme le verre ou le cristal d'une part, et les corps comme l'ambre, la gomme ou la cire d'autre part. Il nomme ainsi les deux électricités « vitreuse » et « résineuse » en référence à ces deux familles. En 1745, von Kleist et von Musschenbroeck (travaillant à Leyde, aux Pays-Bas) découvrent un moyen de stocker l'électricité et baptisent cet instrument la bouteille de Leyde. Ce dispositif deviendra plus tard le condensateur électrique.

La notion de fluide électrique apparaît avec les travaux de Robert Symmer (1707-1763), membre de la *Royal Society*. En réalisant des expériences sur des pièces de tissu — certaines faites involontairement sur les bas qu'il portait — Symmer arrive à la conclusion que l'électricité se comporte comme deux fluides. Si les idées de Symmer prennent rapidement sur le continent, où il sera reconnu dès la fin du XVIIIe siècle comme l'inventeur de la théorie des deux fluides, il peine à s'imposer dans son propre pays. En Grande-Bretagne, ce sont les idées de Benjamin Franklin (1706-1790) qui dominent. Ignorant les hypothèses de Dufay, Franklin considère dès les années 1740 que l'électricité est unique, et emplit tout les corps. Il introduit alors le concept de corps électrisés « positivement » lorsqu'ils ont un excès d'électricité, ou « négativement » dans le cas d'un défaut.³ Cette idée de substance unique sera reprise par certains Britanniques franklinistes, comme Benjamin Wilson, également membre de la *Royal Society*. Les idées de Franklin sont adaptées au concept de fluide, pour donner un fluide unique. Cette dernière théorie prédomine en Grande-Bretagne, alors que la théorie des deux fluides reste majoritaire chez les continentaux.⁴

Avec les études quantitatives de Charles Coulomb, ingénieur militaire de l'école d'artille-

1. Pour des précisions sur cette partie voir Annexe n°1 p. 425.

2. Heilbron 1982, p. 161.

3. Malheureusement pour les physiciens, cet excès de fluide électrique correspond en fait à un défaut d'électrons, entraînant la curiosité à laquelle tout élève est un jour confronté : le déplacement des charges dans un conducteur se fait en sens inverse de la convention attribuant un sens positif au courant.

4. Sur Symmer et les deux fluides voir : Heilbron 1976.

rie de Metz, dans les années 1780, la notion de masse de fluide électrique apparaît. La loi d'interaction entre deux corps chargés, obtenue par Coulomb, peut s'expliquer en faisant l'hypothèse des deux fluides se déplaçant, l'un attribuant une charge positive et l'autre une charge négative. La loi de Coulomb exprime alors que l'action entre les corps est proportionnelle à la masse de fluide contenue dans chacun des corps (et à l'inverse du carré de la distance). Cette hypothèse de fluides électriques restera longtemps utilisée pendant le XIXe siècle, en particulier en France, et avec elle la notion de masses électriques. Elle est reprise par les polytechniciens du début du XIXe siècle, notamment Siméon Denis Poisson, qui établit en 1812 l'équation éponyme.

Si les hypothèses des atmosphères ou des fluides électriques permettent de rendre compte des phénomènes sur la nature de l'électricité, le bât blesse concernant le mécanisme de propagation, notamment sur les actions à distance, ainsi que sur les relations entre mouvement des corps chargés et attraction (ou répulsion) des fluides électriques. L'historien des sciences John Heilbron remarque que « les physiciens du XVIIIe siècle ne se satisfaisaient pas du schéma élémentaire de forces à distance dont les historiens les ont crédités ». ⁵ Deux questions se posent notamment en remarquant que la charge s'accumule à la surface, et donc qu'aucune force ne s'exerce entre fluide(s) électrique(s) et molécules du conducteur : qu'est-ce qui retient une charge à la surface ? Comment les attractions et répulsions électriques développent-elles les forces pondéromotrices qui peuvent engendrer un courant dans les conducteurs ?

Concernant le magnétisme, la principale avancée théorique est encore une fois à mettre au crédit de Coulomb, qui introduit deux fluides — austral et boréal — interagissant via une loi de force en $1/r^2$. Même si cette théorie propose une argumentation moins directe que sa théorie électrique, et que ses mesures magnétiques sont également moins précises, la possibilité de regrouper les différentes interactions sous la bannière de la loi en $1/r^2$, comme la gravitation, séduit les disciples de Laplace. Les théories de l'électrostatique et du magnétisme disposent alors toutes les deux d'une base mathématique fondée sur une même dépendance avec la distance de l'interaction.

Découverte du courant électrique et premières expériences

Les phénomènes de conduction électrique apparaissent à la fin du XVIIIe siècle avec Luigi Galvani, qui réalise sur des grenouilles des expériences électriques, en touchant avec un scalpel électrisé les muscles des batraciens. Interprétant mal les contractions musculaires

5. Heilbron 1981, p. 191.

observées, Galvani attribue à ces phénomènes un caractère inhérent à l'animal. Le physicien de Pavie Alessandro Volta refuse cette hypothèse, et avance que les stimuli sont dûs au corps humide de l'animal et à la jonction entre deux métaux de nature différente : le cuivre retenant l'animal et le zinc du scalpel. En 1800, Volta réalise un système permettant d'amplifier la transmission d'électricité, en superposant des disques de zinc et de cuivre séparés par des rondelles de carton imbibées d'eau salée acidifiée. La « pile » ainsi créée permet de faire dévier l'aiguille d'un électroscope. En dépit de l'hypothèse de Volta sur le caractère purement électrique des phénomènes, la conduction électrique, qui se décline dans différents domaines, ouvre de nouvelles perspectives :⁶

Dans l'ensemble, la nouvelle science du galvanisme offrait un contraste saisissant avec l'électrostatique et le magnétisme. Ces derniers avaient atteint l'état de perfection et étaient fièrement affichés par les Français comme des accomplissements majeurs de leur physique mathématique. Au contraire, le galvanisme était un champ riche, désorganisé, s'étirant dans plusieurs directions (physique, chimie, physiologie et médecine) mais surtout échappant à l'analyse mathématique.

Ces différents domaines vont néanmoins subir un rapprochement certain avec les expériences d'Ørsted en 1820. Utilisant une pile constituée de cellules cuivre-zinc remplies d'un mélange sulfates-nitrites, Ørsted crée un courant au sein d'un câble électrique, et observe l'action que ce courant crée sur une aiguille aimantée, et ce pour différentes positions du câble.⁷ Il tire trois conclusions de ces expériences concernant ce qu'il nomme le « conflit électrique » — le courant électrique étant à son sens une suite de décompositions et recompositions. La première observation est la possibilité pour le conflit électrique d'agir sur un pôle magnétique, ce qui constitue la première liaison entre les domaines de l'électricité et du magnétisme. La deuxième information est qu'il n'est pas circonscrit au fil mais agit également dans le voisinage de celui-ci. Enfin, il forme un vortex autour du fil. Cette notion était d'ailleurs fondamentale pour Ørsted qui « plaçait au centre de l'électromagnétisme la dualité cercle-axe ».⁸ Nous nous permettons ici un aparté anachronique pour mettre en avant à

6. Darrigol 2000 (b), p. 3.

7. Pour observer une déviation maximale il faut que le fil soit placé à l'état initial selon l'axe de l'aiguille de la boussole. Dans un premier temps Ørsted utilise un fil de platine assez fin, qui est porté à incandescence lorsque le courant le parcourt. Par la suite, il utilise un conducteur de diamètre plus important — donc de résistance plus faible — et obtient des effets magnétiques plus importants. Sur la réalisation de l'expérience voir : Steinle 2016, p. 52-9.

8. Darrigol 2000 (b), p. 5. Ørsted introduit pour décrire ce vortex la notion de *dextrorsum*, décrivant en botanique l'hélicité d'une plante grimpante. Cette idée ne résistera pas au « bonhomme d'Ampère » ou au « tire-bouchon de Maxwell » (voir 30 en note).

quel point les caractères essentiels de la future théorie électromagnétique (de Maxwell et ses successeurs) sont présents chez Ersted : effets magnétiques d'un courant électrique, forme « tourbillonnaire » ou « rotatoire » de l'action et importance de l'espace entourant le fil.

Sur ce dernier point, deux remarques sont à faire. D'une part, une distinction quant au vocabulaire utilisé : comme nous l'avons déjà signalé nous appellerons « champ » l'espace ou la région de l'espace où se produisent les phénomènes considérés (électriques ou magnétiques), et « force » ou « force de champ » la grandeur qui quantifie l'action électrique ou magnétique sur un pôle unité. Nous parlerons de « force électrique » ou de « force magnétique » pour désigner les différents cas.⁹ Nous gardons ainsi la distinction faite tout au long du XIXe siècle. D'autre part, concernant l'émergence d'une théorie du champ, Heilbron avance que les « premiers mouvements » dans cette direction sont à chercher du côté des électriciens, et ne seraient pas dus à « des principes fondamentaux de métaphysique, épistémologie ou philosophie naturelle ».¹⁰ Cette origine explique l'absence ou, à l'inverse, la prédominance de l'idée de champ chez les scientifiques qui vont poursuivre les expériences d'électromagnétisme, selon leur formation. Parmi ces scientifiques, nous détaillerons avant tout les travaux d'André-Marie Ampère et Michael Faraday.

1.2 Les fondateurs de l'électromagnétisme

Les travaux d'Ampère

Le premier, mathématicien et physicien français, professeur à l'École Polytechnique, s'intéresse aux interactions dues au courant électrique en 1820, à la suite des expériences d'Ersted. Ses premiers travaux visent à reprendre celles-ci en s'affranchissant de l'action magnétique terrestre, défaut expérimental présent chez Ersted.¹¹ La mise en place de dispositifs pour reproduire les champs magnétiques amène Ampère à introduire le concept de « circuits », dans lesquels circulent des « courants électriques » fermés. Il crée également un appareil dans lequel une aiguille aimantée peut varier selon le courant électrique, qu'il nomme « galvanomètre ». Utilisant l'analogie de forme entre les champs magnétiques créés par un aimant ou par un circuit, il avance :¹²

9. Pour désigner la force au sens moderne, i.e. la grandeur qui fait mouvoir un corps, nous préciserons « force mécanique ». Par exemple, si \mathbf{E} est la force électrique, la force mécanique associée exercée sur une charge q est $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$.

10. Heilbron 1981, p. 188.

11. Pour cela, Ampère utilise une aiguille dite « astatique », orthogonale au champ terrestre.

12. Darrigol 2000 (b), p. 6.

Ainsi, pour celui qui cherche à expliquer l'orientation Sud-Nord [de l'action magnétique terrestre], la plus simple idée ne serait-elle pas de supposer au sein de la Terre un courant électrique ?

Retournant l'identification entre courant électrique et magnétisme, Ampère propose d'expliquer le magnétisme par des courants internes à la matière : les courants particuliers d'Ampère. Ses premières démonstrations, présentées à l'Académie en septembre 1820, cherchent à mettre en avant l'équivalence entre un circuit hélicoïdal et un barreau aimanté. Les expériences suivantes prennent un tour plus quantitatif, Ampère cherchant à décrire les actions des courants entre eux : « Depuis le début de ses travaux il s'attendait à ce que l'interaction entre deux courants puisse être analysée en termes d'éléments de courant ». ¹³ Ampère en déduit la loi d'interaction entre deux éléments infinitésimaux de courant, qui s'exprime (en formalisme actuel) :

$$d^2 \mathbf{f} = -ii' \frac{\mathbf{r}}{r} \left[\frac{d\mathbf{l} \cdot d\mathbf{l}'}{r^2} - \frac{3}{2} \frac{(\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l})(\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l}')}{r^4} \right] \quad (1.1)$$

Avec :

- $d\mathbf{l}$ et $d\mathbf{l}'$ les éléments parcourus par les courants (resp.) i et i' .
- \mathbf{r} le vecteur $\mathbf{l} - \mathbf{l}'$, r sa norme.

Pour la dépendance en distance, Ampère utilise le dispositif de la figure 1.1. Pour la dépendance angulaire, il met en place un second dispositif dans lequel les portions parcourues par des courants (AB et CD sur la figure 1.1) sont libres de tourner dans un plan perpendiculaire à la ligne joignant les centres des deux éléments de courant (ligne qui serait orientée selon la verticale dans la figure proposée).

La réduction du magnétisme à un phénomène électrique était pour Ampère une première étape vers une théorie plus unifiée et harmonieuse des phénomènes physiques, avec la suppression *de facto* des fluides magnétiques, s'écartant du même coup de la doxa laplacienne. Concernant la nature du courant électrique en revanche, les conceptions d'Ampère ne diffèrent pas de celles de ses contemporains : ¹⁴

13. Darrigol 2000 (b), p. 7.

14. Darrigol 2000 (b), p. 13.

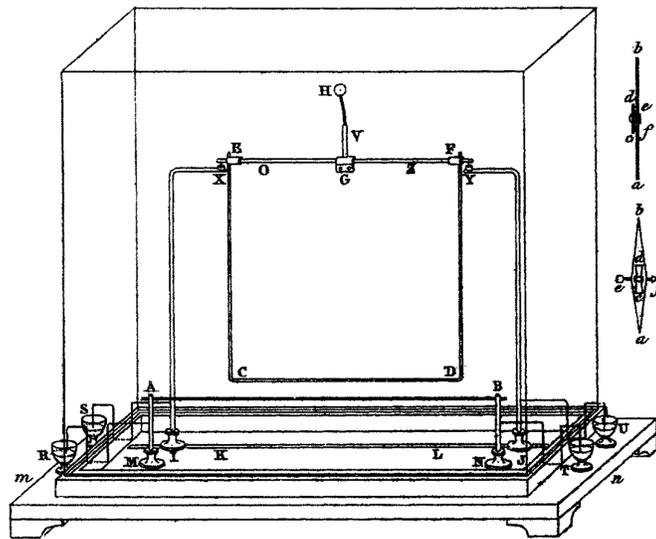


FIGURE 1.1 – Dispositif utilisé par Ampère pour mettre en évidence l'action réciproque de courants parallèles. Les portions AB et ECDF sont parcourues par des courants. L'action de AB sur CD entraîne une rotation de celle-ci autour de l'axe EF (non conducteur). (Ampère, 1820. Tiré de Darrigol 2000 p. 8).

Sur la nature du courant électrique, il suivait l'idée française d'un double flux de fluides électriques négatif et positif, lui ajoutant seulement que l'intensité du flux était la même tout au long du circuit. Il insistait sur le fait que ses déductions ne dépendaient d'aucun modèle particulier du courant électrique, et gardait ses hypothèses sur des mécanismes sous-jacents d'éther surtout pour lui-même. [...] Enfin, il ne concevait pas le caractère central des forces agissant entre éléments de courant comme hypothétique : son dispositif pour les courants rectilignes semblait garantir l'existence physique de ses forces.

En dépit de ses contributions à l'électrodynamique, Ampère subit de nombreuses critiques de la part de ses collègues, par exemple de la part d'Ørsted à propos de ses qualités d'expérimentateurs et de la complexité de ses dispositifs — critiques qui sont en grande partie justifiées — ou, de la part de Biot notamment, sur des points plus théoriques de ses conceptions sur les fluides électriques — critiques qui le sont probablement moins. Ampère fait ses expériences avec un objectif précis, et en connaît en général le résultat à l'avance. Il inscrit les preuves expérimentales au sein d'une conception théorique déjà établie, limitant ainsi les possibles ouvertures à d'autres concepts. Le contre-pied sera pris de l'autre côté de la Manche.

Faraday et l'expérience

Michael Faraday débute ses travaux scientifiques dans le domaine de la chimie. Repéré par Humphry Davy, alors déjà figure tutélaire de la chimie, il devient son assistant. C'est sous sa direction que Faraday établit un premier contact avec le domaine de l'électromagnétisme, en 1820 après l'expérience d'Ørsted. Reprenant les idées de son mentor Davy et de William Wollaston, autre grande figure de la physique en Grande-Bretagne — qui est d'ailleurs élu président de la *Royal Society* en 1820 —, Faraday met en place un processus minutieux d'étude de l'action d'un courant sur une aiguille aimantée. De ses observations, il déduit que le mouvement rotatoire est un caractère fondamental des phénomènes électromagnétiques. S'il n'est pas le premier à mettre en avant ces rotations — Ørsted et Wollaston l'ayant fait auparavant — Faraday est le premier à les concrétiser, comme l'illustre son expérience de 1821 montrant le mouvement de rotation d'un fil parcouru par un courant dans un bain de mercure (voir figure 1.2).

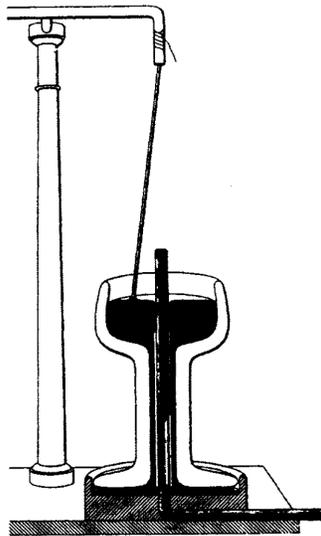


FIGURE 1.2 – Dessin du dispositif de Faraday. Une tige métallique plonge dans un bain de mercure (métal conducteur) dans lequel se trouve un aimant fixe. Lorsque la tige est parcourue par un courant électrique, celle-ci se met en mouvement autour du pôle de l'aimant. (Version plus récente du dispositif). Tiré de Darrigol 2000 p. 19.

Cette expérience de rotation d'un fil électrique illustre parfaitement le talent d'expérimentateur de Faraday, qui parvient même à réaliser des modèles réduits de son dispositif pour les envoyer à ses homologues à travers l'Europe. Soulignons que c'est au cours d'une

seule et même journée qu'il parvient à une version presque définitive de son dispositif, en étant parti de la simple action d'un courant électrique sur une aiguille aimantée. Mais c'est avant tout le cheminement intellectuel que suit Faraday qui marque un tournant dans ses conceptions. Les notes expérimentales qu'il prend tout au long de cette journée du 3 septembre 1821 montre le passage d'une hypothèse d'action à distance basée sur l'attraction et la répulsion, à une action plus générale de rotation, dont attraction et répulsion ne seraient que des conséquences. Le courant électrique aurait ainsi pour effet de faire tourner l'aiguille.

Ce changement d'approche amène Faraday à dessiner ses premiers cercles magnétiques (il n'utilise pas encore le terme de « ligne de force ») symbolisant la direction de la force magnétique créée en tout point par le fil. C'est cette nouvelle idée de circularité de l'action magnétique qui lui fait imaginer le mouvement rotatoire d'un pôle magnétique autour du fil, et inversement (dans son dispositif Faraday réalise les deux montages). Soulignons enfin un dernier point : cette modification dans les idées de Faraday est en partie liée à un changement de générateur. Dans l'étude qu'il fait des effets d'un courant électrique sur une aiguille aimantée, Faraday utilise à partir du 3 septembre un générateur appelé *calorimotor* de Hare, plus puissant que les piles qu'il prenait jusque-là.¹⁵ Avec un courant plus important, il améliore la précision de ses mesures, ce qui lui permet de reconsidérer les effets d'attraction et répulsion en des actions circulaires.

C'est dans cette logique que Faraday cherche à mettre en évidence la possibilité de créer un courant électrique à partir d'une action magnétique. Après deux tentatives infructueuses en 1825 et 1828, il construit en 1831 un dispositif constitué de deux circuits, l'un relié à une source de courant, l'autre à un galvanomètre. Ces deux circuits sont enroulés de chaque côté d'un anneau de fer, servant à diriger « la puissance magnétique du premier circuit vers le second ». Avec cette configuration, Faraday réussit à montrer l'apparition d'un courant électrique dans le second circuit. Ce courant induit n'ayant lieu que lors de variations du courant inducteur, Faraday introduit l'idée d'un état particulier, qu'il nomme « électro-tonique » : l'apparition d'un courant dans le premier circuit crée un courant transitoire dans le circuit secondaire, qui passe dans l'état électro-tonique, et dans lequel il reste tant que le courant inducteur perdure. La disparition de ce dernier entraîne la relaxation du circuit secondaire, avec création d'un courant transitoire opposé.

Le lien entre rotation et induction est démontré par Faraday lorsque celui-ci s'intéresse à

15. Créé en 1817 par le chimiste américain Robert Hare (1781-1858), le calorimotor est une sorte de condensateur comprenant plusieurs paires de plaques assemblées en parallèle, pour augmenter la surface totale. L'intensité délivrée lors de la décharge est ainsi plus élevée. Pour les précisions expérimentales sur l'expérience de Faraday voir Steinle 2016, p. 230-2.

l'action d'un aimant sur une plaque métallique en rotation, toujours en 1831.¹⁶ L'observation du courant créé dans la plaque (en contact avec des collecteurs) pousse Faraday à introduire la notion de « courbe magnétique » ou « ligne de force magnétique », correspondant à la courbe tangente en tout point à la force exercée sur une petite aiguille aimantée. Élargissant cette notion au cas de deux conducteurs en mouvement relatif, puis au cas des courants variables, Faraday relie les lignes de force à l'état électro-tonique : il considère que le courant inducteur crée des lignes de force qui viennent ensuite couper le circuit secondaire, au sein duquel un courant est induit à son tour.¹⁷

Faraday s'illustre également dans un autre domaine, celui de l'électrochimie, principalement en 1833. Outre la loi qu'il formule, et qui porte aujourd'hui son nom,¹⁸ Faraday tire de ses études une conception nouvelle sur le courant électrique. Suspicieux quant à l'existence des fluides électriques, Faraday préfère voir le courant comme un série de décompositions et recompositions successives, qui créent des variations de la polarisation au sein du corps. Désireux de s'affranchir du vocabulaire déjà existant comme le « pôle positif » d'une pile, Faraday crée, lors de discussions avec le révérend William Whewell, une série de termes comme « anode », « cathode » ou « électrolyse ».¹⁹

Après l'électrochimie qui lui a permis de donner une nouvelle vision du courant électrique, Faraday travaille dans autre domaine, qui le pousse cette fois à redéfinir la charge électrique : il étudie les condensateurs (dispositifs formés de deux plaques reliées chacune par un fil au générateur et séparées par un milieu isolant : de l'air, ou un milieu solide comme le verre). Les progrès de Faraday l'amènent à considérer ces condensateurs comme polarisés, de la même façon qu'un aimant : une plaque correspondrait au pôle Nord, une autre au pôle Sud. Faraday applique cette idée à chaque portion située à l'intérieur du condensateur, de telle sorte que chaque portion ait une face chargée positivement, une autre négativement. Les seules exceptions sont les deux surfaces de contact entre l'isolant du condensateur et le fil conducteur, dans lequel la polarisation ne peut pas exister (puisque les charges peuvent s'y déplacer). Dans ce cas, la charge qui apparaît sur les plaques du condensateur constitue la terminaison des lignes de polarisation situées dans l'isolant. Cette charge doit donc être vue comme l'extrémité du milieu isolant, et non comme appartenant au conducteur. Pour

16. L'effet avait déjà été observé par Arago lors de ses mesures du champ magnétique terrestre en 1822.

17. *Ibid.*, p. 35.

18. La loi de Faraday pour l'électrochimie pose que la charge échangée lors d'une réaction est proportionnelle à la quantité de matière des ions mis en jeu : $Q = nzF$ où Q est la charge totale, n la quantité de matière d'un ion, z sa valence et $F = 96485 C$ la constante de Faraday (correspondant à la charge électrique d'une mole d'ion monovalents). La charge Q est reliée au courant I reçu (pour une électrolyse) ou fourni (pour une pile) par la relation $Q = I\Delta t$.

19. *Ibid.*, p. 82-3.

désigner ce milieu isolant capable de propager la polarisation et la force électrique, Faraday introduit le terme de *diélectrique*.²⁰

Concernant les hypothèses physiques sous-jacentes aux phénomènes, Faraday ne cherche donc pas à utiliser, ni même à approfondir, celles déjà existantes. Il refuse la notion de fluides électriques ou magnétiques agissant à distance. Le courant et la charge sont tous les deux définis à partir de la polarisation : le premier comme étant une variation, la seconde constituant la terminaison des lignes de polarisation, ou lignes de forces. Il préfère d'ailleurs cette idée de lignes de force à l'hypothèse d'un milieu intermédiaire. Cette position sera amenée à changer vers la fin de sa carrière, où il se montre plus conciliant. Ainsi, il ouvre la porte à la notion d'éther pour les actions électriques et magnétiques :²¹

Pour ma part, [...] sur la question de la relation entre le vide et la force magnétique, et du caractère général des phénomènes magnétiques extérieurs aux aimants, je suis bien plus favorable à l'hypothèse que dans la transmission de la force il y ait une telle action [d'un milieu intermédiaire], extérieure à l'aimant, plutôt que les effets soient purement l'attraction et la répulsion à distance. Une telle action peut être une fonction de l'éther ; car il n'est pas improbable que, s'il y a un éther, il ait d'autres utilités que simplement la transmission des rayonnements (*NdA* : optiques).

Conclusion

La découverte du courant électrique à l'aube du XIXe siècle a ouvert la porte à une série d'expériences fondatrices pour l'électromagnétisme. Au fil des améliorations techniques (stabilité du courant, puissance, ...), des lois ont pu être formulées, qu'elles soient établies sur une théorie sous-jacentes ou purement phénoménologiques. Ainsi, l'étude d'Ampère sur les courants a permis d'établir une loi de conservation qui vaudra à son auteur d'être considéré par Maxwell comme « le Newton de l'électricité ». De la même façon, les expériences de Faraday, et la loi d'induction qu'il en tire, seront tout aussi importantes pour les travaux postérieurs. Mais c'est sa conception des phénomènes qui vaudra à Faraday d'être l'artisan de la théorie électromagnétique, avec la place fondamentale qu'il accorde au champ électromagnétique.

20. *Ibid.*, p. 86.

21. Maxwell 1878, p. 771. Cite Faraday.

Chapitre 2

Je suis un peu couvert d'éther.
J'ai voyagé !
J'ai les yeux tout remplis de
poudre d'astres.

Edmond Rostand

Maxwell, de l'hypothèse à la théorie

La théorie de l'électromagnétisme a connu ses grands débuts aux alentours de 1850, sous l'impulsion de physiciens principalement britanniques et allemands. Parmi eux, la contribution la plus importante pour ce qui est des théories de l'éther est celle de James Clerk Maxwell. Dans ce chapitre, nous montrerons comment celui-ci est parti d'une idée de Faraday, à savoir le rôle central du milieu de propagation, pour aboutir à une théorie dynamique complète. Bien que son œuvre s'étale sur plus de vingt ans, nous prêterons particulièrement attention au mémoire de 1861, car, pour l'historien Daniel Siegel, c'est l'introduction du terme de courants de déplacement, menant à l'unification de l'électromagnétisme et de l'optique qui constitue le « pas en avant crucial » fait par Maxwell.¹ La fin du chapitre rappellera les principaux éléments de l'ouvrage de référence de Maxwell, le *Treatise on Electricity and Magnetism*,² qui s'est ensuite répandu dans la communauté scientifique française.

2.1 L'effet Faraday

La découverte de Faraday et l'interprétation de Thomson

En septembre 1845, Faraday met en évidence l'action d'un champ magnétique dans un milieu transparent sur la polarisation de la lumière qui le traverse. Ce phénomène magnéto-optique sera un élément majeur dans la construction de la théorie de Maxwell.

L'hypothèse d'une influence de l'électricité sur la polarisation de la lumière a été émise par l'astronome John Herschel en novembre 1845.³ Il remarque que plusieurs phénomènes

1. Siegel 1991, p. 1.

2. Maxwell 1873.

3. Sir John Herschel (1792-1871), astronome et physicien britannique. Il a notamment prouvé l'existence

impliquent une dissymétrie hélicoïdale, notamment la déviation de la polarisation de la lumière au sein de cristaux, celle obtenue par certaines solutions dont les molécules présentent elles-mêmes une dissymétrie (solutions optiquement actives), ainsi que la déviation par un courant électrique d'une aiguille magnétique. Dans une lettre à Faraday il écrit :⁴

Ainsi, l'induction m'a amené à conclure qu'une telle connexion existe, et doit intervenir d'une manière ou d'une autre, entre le courant électrique et la lumière polarisée, et que le plan de polarisation devrait être dévié par l'effet magnéto-électrique.

Faraday avait déjà travaillé sur cette relation entre électricité et polarisation optique. Dès 1834, il avait étudié le comportement de rayons lumineux à travers un électrolyte (solution traversée par un courant), mais sans succès. En 1845, il reprend le sujet et après des essais infructueux sur l'air, il montre que le plan de polarisation de la lumière subit une rotation en traversant un certain type de verre lourd, lorsque celui-ci est soumis à un champ magnétique (voir figure 2.1).⁵ Faraday confirme ses observations en renouvelant l'expérience avec d'autres corps transparents (eau, verre, alcool...).⁶ Certaines solutions (comme le glucose) étaient déjà connues pour avoir des propriétés optiques rotatoires.⁷ Faraday en déduit une sorte d'analogie entre les substances qui sont optiquement actives « par nature », et d'autres qui le deviennent lorsque soumises à un champ magnétique extérieur, de la même façon que certains matériaux sont des aimants permanents et d'autres créent un champ magnétique lorsqu'ils sont traversés par un courant.⁸

Dans les années 1840, la théorie de la chaleur est déjà largement développée, notamment

d'un rayonnement en dehors du spectre lumineux, qu'il nomme rayonnement calorifique (infrarouge). Il est le fils de William Herschel, astronome resté célèbre pour la découverte d'Uranus.

4. Jones 1870, vol. II, p. 201.

5. Le « verre lourd » utilisé par Faraday (*silicated borate of lead*) est un verre contenant de l'oxyde de plomb. Dans le langage courant, il est improprement nommé « cristal », malgré son caractère amorphe et l'absence d'une structure cristalline... (voir Faraday 1839, vol. III, p. 3).

6. La rotation du plan de polarisation est liée à l'intensité de l'induction magnétique B — et donc à la perméabilité magnétique — ainsi qu'à la longueur du trajet. Négligeable dans l'air, la perméabilité relative est (très légèrement) plus grande dans d'autres corps transparents. Faraday donne des valeurs de rotation normalisée : si l'eau donne une rotation de 1, le verre lourd donne une rotation de 6,0. L'alcool et l'éther diéthylique ont des effets inférieurs à celui de l'eau. (*Ibid.*, p. 18). Il teste également plusieurs types de verre, dont les « verres flint » (*flint-glasses*, également appelés « verres de silex ») très réfringents et les « verres crown » (*crown-glasses*), faiblement réfringents, qui présentent tous deux un effet rotatoire, bien que plus faible que celui du verre lourd. *Ibid.*, p. 34.

7. Faraday compare les effets de l'eau et du verre à l'action optique de l'huile de térébenthine, solution optiquement active, qui donne une valeur de 11,8 d'après la normalisation ci-dessus (*Ibid.*, p. 18).

8. Darrigol 2000 (b), p. 97.

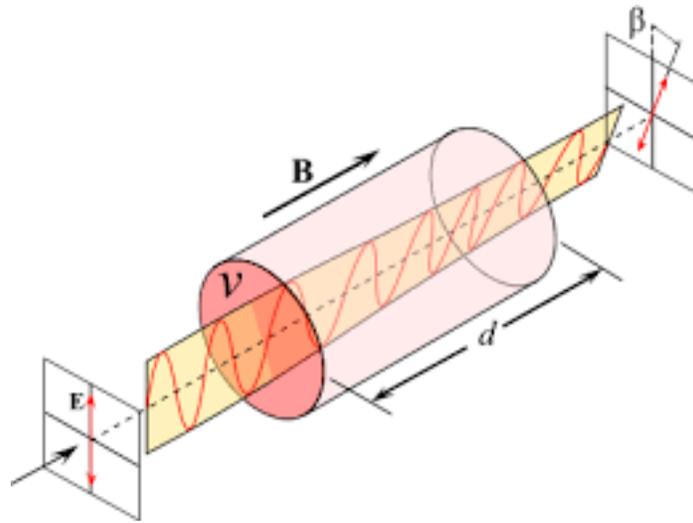


FIGURE 2.1 – Schéma moderne de l'effet Faraday : en traversant un milieu aimanté, le plan de polarisation de l'onde électromagnétique (défini par la direction de propagation et la direction du champ électrique de l'onde) est dévié d'un angle proportionnel au champ magnétique \mathbf{B} existant dans le milieu.

grâce à l'influence du physicien français Joseph Fourier et de son ouvrage *Théorie analytique de la chaleur*. Le jeune William Thomson, physicien britannique passé par les bancs de Cambridge, s'inspire largement des raisonnements de Fourier et utilise des analogies entre chaleur et électrostatique pour démontrer de nouveaux théorèmes. Assez rapidement, Thomson se range du côté d'une théorie dynamique de la chaleur : les forces exercées au sein d'un système ne sont pas dues à des forces d'attraction ou de répulsion entre les particules, mais à des mouvements au sein du matériau. Il suit en ce sens les théories de Davy et de William Rankine, pour qui la propagation de la chaleur est due à des mouvements individuels, des « vortex moléculaires » d'après l'expression de Rankine. La nature du fluide dans lequel ces vortex prennent place n'est pas précisée, il peut s'agir d'un fluide continu ou d'un fluide « moléculaire », composé d'éléments insécables.

Thomson accorde une grande importance à l'effet Faraday, reliant les propriétés optiques au magnétisme. Ce résultat permet, d'après lui, de découvrir la vraie nature du magnétisme :⁹

De là il apparaît que la découverte optique de Faraday est une preuve de la réalité de l'explication d'Ampère sur la nature ultime du magnétisme.

En particulier, Thomson est frappé par la modification du sens de rotation du plan de po-

9. Thomson 1856, p. 152.

larisation en fonction du sens de propagation du rayon lumineux. En effet, un rayon se propageant dans une certaine direction et subissant une rotation dans le sens direct — *right-handed rotation* — est soumis à une rotation dans le sens indirect lorsqu'il se propage dans le sens inverse. Les solutions chimiques optiquement actives, comme les solutions de sucre, engendrent toujours le même sens de rotation de la polarisation lumineuse — selon qu'elles soient dextrogyres ou lévogyres — et leur pouvoir optique peut être expliqué par l'existence de structures microscopiques hélicoïdales.

L'explication de l'effet Faraday nécessite quant à elle la définition d'un sens de référence, qui va alors être pris par rapport à la ligne de force (telle que donnée par Faraday). Pour Thomson, cela revient à voir la ligne de force comme un axe de rotation dans le milieu à travers lequel la lumière se propage. Cette vision lui permet de relier le phénomène de magnétisme à la théorie des vortex de Rankine : une ligne de force correspond à un alignement des axes des vortex. Ainsi, Thomson explique :¹⁰

Un certain alignement des axes de révolution dans ce mouvement EST le *magnétisme*. L'expérience magnéto-optique de Faraday en fait, non une hypothèse, mais une conclusion établie.

Thomson gardera d'ailleurs une certaine vision du magnétisme, et une volonté de réduire les phénomènes électro-magnétiques à la mécanique. Plusieurs années après, il affirmera son point de vue sur la nature de ces phénomènes :¹¹

L'explication de tous les phénomènes d'attraction ou de répulsion électro-magnétique, ainsi que de l'induction électro-magnétique, est à chercher simplement dans l'inertie et la pression de la matière dont les mouvements constituent la chaleur.

Il est important de souligner que Thomson ne fait ici aucune hypothèse concernant cette « matière ». Il mentionne l'hypothèse d'un fluide continu — occupant les espaces entre les molécules de matière ordinaire —, d'un fluide lui-même moléculaire, mais également d'une continuité de la matière ordinaire, et dont les inhomogénéités seraient la cause de la propagation de la chaleur.

10. Thomson 1872, p. 224. Les accentuations (majuscules et italiques) sont de Thomson. Ce passage est tiré d'une conférence de mai 1860 devant la *Royal Institution*.

11. *Ibid.*, p. 420. La citation, tirée d'une conférence de 1872, est ajoutée à l'article présenté le 10 mai 1856 devant la *Royal Society* « *Dynamical Illustrations of the Magnetic and the Helicoidal Rotatory effects of Transparent Bodies on Polarized Light* » (pour l'article en question voir *Proceedings of the Royal Society*, 12 juin 1856).

Les débuts de Maxwell

Cette vision de Thomson a une grande influence sur Maxwell, écossais, de quelques années son cadet, et également sorti de l'université de Cambridge. Maxwell prend rapidement connaissance de l'article de son aîné :¹²

Le professeur Thomson a mit en évidence que la cause de l'action magnétique sur la lumière devait être une réelle rotation se produisant dans le champ magnétique.

D'autre part, lors de la lecture de l'ouvrage de Faraday *Experimental Researches*,¹³ Maxwell avait déjà été particulièrement impressionné par la théorie des lignes de force. Doué de la même imagination que Faraday, et possédant en plus un talent mathématique, notamment pour la géométrie, Maxwell se fixe pour objectif de concilier la théorie de Faraday avec la vision du magnétisme de Thomson.

2.2 On Faraday's Lines of Force

Dans son premier grand travail en électricité et magnétisme — « On Faraday's Lines of Force »,¹⁴ publié en 1856 — Maxwell utilise des analogies pour déterminer les relations sur les grandeurs électriques, magnétiques ou galvaniques. Dans ce premier mémoire, Maxwell n'utilise pas les considérations de Thomson, en particulier sur l'effet Faraday, mais directement les travaux de Faraday sur le tracé des lignes de force.

Le rôle des analogies chez Maxwell

Il convient ici de faire un aparté pour mettre en avant la conception que Maxwell a, tout au long de sa carrière, de l'utilisation de ces analogies, outil dont il se sert à plusieurs reprises dans ses travaux. Influencé par ses études en Écosse, où la représentation mécanique comme interprétation analogique est un courant dominant, Maxwell est convaincu de la nécessité de se placer dans un cadre mécaniste. Il rejette l'approche purement mathématique ou algébrique, considérant les mathématiques abstraites comme infructueuses. À ses yeux, une analogie ne

12. Siegel 1991, p. 35. Cite Maxwell.

13. Faraday 1839.

14. Maxwell 1965, pp. 155-230.

peut constituer une approche systématique mais seulement un prélude à une théorie plus complète. Il suit en ce sens l'idée de Thomson.¹⁵

D'autre part, les analogies ont chez Maxwell, comme chez beaucoup d'autres physiciens du XIXe siècle, une grande valeur pédagogique. Mathématicien autant que physicien, Maxwell n'en regarde pas moins comme une erreur de considérer la physique uniquement d'un point de vue mathématique formel :¹⁶

Dans l'intérêt de personnes ayant [...] des façons de raisonner différentes, la vérité scientifique devrait être présentée sous des formes variées.

Face à un domaine de l'électricité dont les connaissances sont à ce moment plutôt éparses, une science « particulièrement défavorable à la supposition »,¹⁷ Maxwell choisit l'analogie comme outil de départ pour démarrer une construction de l'électromagnétisme. Il fait montre en présentant ses premiers travaux de toute la déférence nécessaire. D'une part, il sait parfaitement que certaines théories de l'électromagnétisme existent déjà, le plus souvent basées sur des interactions à distance — notamment celle de Weber, « si élégante et si mathématique ». ¹⁸ D'autre part, Maxwell, encore jeune scientifique, fait face à la difficulté d'imposer son point de vue sans avoir réalisé d'expériences, contrainte particulièrement forte dans le domaine de l'électricité. C'est donc en pleine connaissance des limites — et du caractère heuristique — de sa construction qu'il la présente :¹⁹

Si les résultats de pure spéculation auxquels je suis arrivé se révèlent d'une quelconque utilité aux philosophes et expérimentateurs, pour arranger et interpréter leurs résultats, ils auront atteint leur but.

L'analogie fluide

Dans le mémoire « *On Faraday's Lines of Force* », Maxwell établit une analogie entre les lignes de force définies par Faraday pour différents phénomènes et les lignes de courant d'un fluide. L'analogie avec « un fluide imaginaire incompressible » a pour objectif d'être plus concrète que l'analogie avec la chaleur construite par Thomson, la chaleur n'étant alors plus définie comme une substance. Maxwell y décrit le mouvement d'un fluide incompressible et

15. *Ibid.*, p. 168.

16. Hunt 1991, p. 74. Cite Maxwell, les suspensions sont de Hunt.

17. Siegel 1991, p. 30.

18. *Ibid.*, p. 32.

19. *Ibid.*, p. 33. Cite Maxwell.

impondérable à travers un milieu poreux. Il définit des tubes de courant de section unitaire, de telle sorte qu'une unité de volume passe à travers une section en une unité de temps.

Le caractère stationnaire du mouvement du fluide donne une vitesse proportionnelle au gradient de pression. Afin d'utiliser cette relation au mieux, Maxwell introduit des surfaces d'égale pression. Cela lui permet ensuite de définir l'énergie perdue dans le milieu résistant : l'unité est définie comme la diminution d'énergie pour un tube de courant entre deux surfaces consécutives. Il applique les relations pour les trois domaines étudiés par Faraday : l'électrostatique, le magnétisme et l'électrocinétique. Ainsi, en électrostatique, les lignes de courant correspondent aux lignes d'induction définies par Faraday, la pression au potentiel électrostatique et la résistance à la permittivité d'un diélectrique (ou « capacité inductive »). De même, pour le magnétisme, les tubes de courant représentent les lignes de force magnétiques, et dans le cas de l'électrocinétique ils correspondent aux courants électriques.

Les limites

L'analogie du fluide incompressible se heurte à deux obstacles majeurs. D'une part, le raisonnement de Maxwell est purement géométrique, et basé sur un fluide incompressible avec un mouvement stationnaire. Maxwell reste ici complètement dans son objectif de donner une analogie, comme un simple outil pouvant initier des raisonnements plus concrets. D'après Siegel :²⁰

Il avertissait régulièrement et explicitement le lecteur que le fluide considéré était « un fluide imaginaire », et pas même « un fluide hypothétique ».

L'autre point limitant de cette analogie réside dans son impossibilité à unifier les trois phénomènes. Si Maxwell peut appliquer son raisonnement aux trois interactions séparément, il n'est pas encore en mesure de joindre plusieurs de ces éléments. Dans ce premier mémoire de 1855, Maxwell ne cherche pas à établir un modèle mécanique des actions électromécaniques, mais affiche néanmoins son ambition d'y parvenir.

2.3 De l'analogie au modèle

L'assertion de Thomson selon laquelle il est temps « d'aller plus loin » que la simple analogie en électromagnétisme est rapidement suivie par Maxwell, qui présente en 1861-62 un

²⁰. *Ibid.*, p. 31.

modèle liant les différents phénomènes dans son mémoire « *On Physical Lines of Force* ». ²¹ Ce mémoire est constitué de quatre parties, dont les deux premières sont publiées entre mars et mai 1861, et les deux suivantes en janvier 1862. Il se présente comme une construction progressive, dans laquelle Maxwell introduit, dans chacune de ses quatre parties, un élément nouveau. D'autre part, si son premier mémoire laissait transparaître le respect que Maxwell avait pour la théorie de Weber notamment, celui-ci débute sur un ton bien différent : ²² :

Nous ne sommes pas satisfaits des explications basées sur l'hypothèse des forces attractives et répulsives dirigées selon les pôles magnétiques, bien que nous pourrions nous satisfaire du fait que le phénomène s'accorde parfaitement avec cette hypothèse, et nous ne cessons de penser qu'en tout point où se trouvent ces lignes de force, un état ou une action physique doit exister avec une énergie suffisante pour produire le phénomène observé. [...] Mon objectif dans cet article est d'ouvrir le chemin dans cette direction, en étudiant les résultats mécaniques de certains états de tension ou de mouvement d'un milieu, et de les comparer avec les phénomènes observés de magnétisme et d'électricité.

Ainsi, dans une référence à peine cachée aux théories d'action à distance, en particulier celle de Weber, Maxwell remet en cause cette hypothèse fondamentale, et fait du champ électrique et magnétique l'élément majeur de sa propre théorie.

Le champ magnétique

La première partie du mémoire se limite au domaine du magnétisme. Depuis « *On Faraday's Lines of Force* », Maxwell a été convaincu, par le raisonnement de Thomson, de la nature rotationnelle du champ magnétique. Comme il l'expliquera plus tard : ²³

Le déplacement des électrolytes dans des directions fixées par le courant électrique, et la rotation de la lumière polarisée dans des directions fixées par la force magnétique sont [...] des faits dont la considération m'a poussé à regarder le magnétisme comme un phénomène de rotation, et les courants électriques comme des phénomènes de translation.

Reprenant l'idée de vortex, Maxwell construit un milieu dans lequel les contraintes et les

21. Maxwell 1861. Voir aussi Maxwell 1965, pp. 451-513.

22. Maxwell 1861, part. I, p. 162.

23. Maxwell 1861, part. IV, p. 87.

pressions sont dues au mouvement local de ces vortex. Il considère ainsi des filaments, sorte de chaînes de vortex en rotation alignés : la force centrifuge entraîne une pression plus élevée sur les côtés que dans l'axe du vortex. Les filaments auront ainsi tendance à s'élargir dans le plan horizontal et à se raccourcir dans la direction de l'axe de rotation, ce qui rejoint les observations faites pour les lignes de force magnétiques.²⁴

Maxwell s'attèle ainsi à l'écriture du tenseur des contraintes dans ce milieu, qui doit lui permettre de retrouver les forces observées dans le cas du magnétisme. Un résumé rapide (et dans un formalisme anachronique) de sa démarche est le suivant : en notant p une pression isotrope, μ la masse volumique du milieu considéré et $\boldsymbol{\omega}$ la vitesse circonférentielle, le tenseur des contraintes s'écrit :²⁵

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu\omega_i\omega_j \quad (2.1)$$

En dérivant et après réécriture, on obtient la force (par unité de volume) :

$$\mathbf{f} = (\nabla \cdot \mu\boldsymbol{\omega})\boldsymbol{\omega} + (\nabla \wedge \boldsymbol{\omega}) \wedge \mu\boldsymbol{\omega} + \nabla \left(\frac{1}{2}\mu\boldsymbol{\omega}^2 \right) - \nabla(p) \quad (2.2)$$

Si l'on excepte le dernier terme (pour lequel Maxwell ne trouvera pas de signification) la force ainsi obtenue se comprend parfaitement sous le prisme du magnétisme :

- le premier terme correspondrait à la force (mécanique) exercée par une force magnétique \mathbf{H} sur une masse magnétique $\nabla \cdot (\mu\mathbf{H})$ (par analogie avec l'électrostatique).
- le deuxième terme est la force de Laplace exercée sur un courant $\nabla \wedge \mathbf{H}$.
- le dernier terme correspond à la pression magnétique. La fraction dans le gradient est l'expression de l'énergie magnétique.

L'analogie se conclut de façon triviale en associant le vecteur vitesse $\boldsymbol{\omega}$ à la force magnétique \mathbf{H} , et la masse volumique μ à la capacité magnétique inductive (également « pouvoir magnétique » ou « perméabilité magnétique ») du milieu.

24. Siegel 1991, p. 60.

25. On définit la vitesse circonférentielle comme le vecteur ayant pour direction l'axe de rotation et pour norme la vitesse linéaire prise sur le bord du vortex.

Faire tourner le monde

Dans la deuxième partie de son mémoire, Maxwell cherche à utiliser sa théorie des vortex magnétiques pour expliquer les phénomènes électriques :²⁶

Nous devons maintenant aborder le lien de ces vortex avec les courants électriques, bien que nous soyons toujours dans le doute quant à la nature de l'électricité, qu'elle soit une substance, deux substances, ou pas de substance du tout, dans quelle mesure elle diffère de la matière, et comment elle est connectée avec celle-ci.

On voit ici que Maxwell ne cherche pas à justifier son modèle par des considérations physiques faites *a priori* sur la nature des entités considérées. De manière générale, dans l'établissement de sa théorie, Maxwell se base fortement sur les expériences (notamment les lois expérimentales d'Ampère et de Faraday, auxquelles il donne une expression mathématique), mais ne cherche pas à faire d'hypothèses sur la nature de l'électricité ou de la charge. De la même façon, il ne donne aucune signification réelle à son milieu dans lequel s'exerce les contraintes, ou même sur la forme et la distribution des vortex. Lorsqu'il s'agit de trouver des coefficients numériques précis, Maxwell utilise le cas le plus simple de vortex circulaires et tous identiques, mais dans le cas général il se contente d'introduire un coefficient de proportionnalité dépendant des caractéristiques des vortex.

De manière beaucoup plus terre-à-terre, le modèle construit par Maxwell pose un problème : si les tubes de force se comportent comme des tubes contenant du fluide en rotation, et si le champ magnétique est analogue à une vitesse circonférentielle, alors en tenant compte des conditions aux limites, deux vortex côte-à-côte devraient avoir des sens de rotation opposés, donc une résultante du champ magnétique qui s'annule. Maxwell rajoute donc des roulements à billes entre ses vortex, des *idle wheels* qui resteront comme l'élément le plus marquant de son modèle. En ajoutant ces couches de petites billes entre chaque vortex, le sens de rotation de ceux-ci devient identique (voir figure 2.2). On peut noter que Maxwell était fin connaisseur de la mécanique appliquée, qu'il enseignait à ses étudiants.

La réalité des vortex

Pour Maxwell, les vortex ont bien une valeur physique. Si les deux premières parties de son mémoire semblent parfois hésitantes à ce sujet, Maxwell y considère « l'hypothèse des

26. Maxwell 1861, part. II, p. 282.

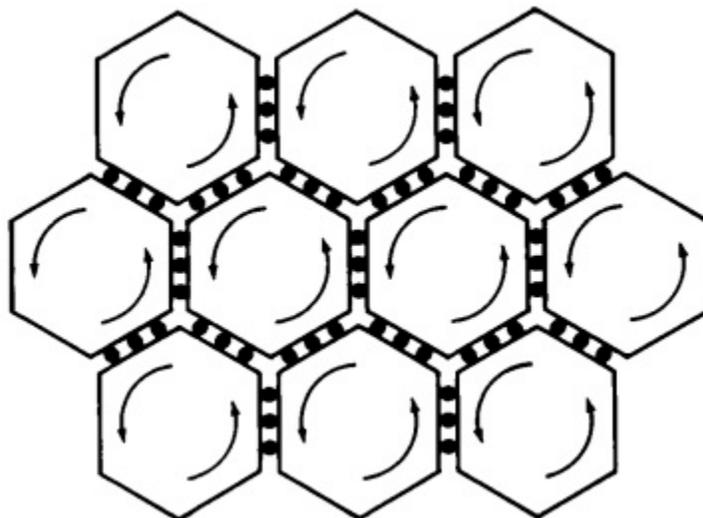


FIGURE 2.2 – Schéma du modèle de Maxwell mettant en jeu les vortex et les billes (tiré de Siegel 1991, p. 67). La représentation des cellules sous forme d'hexagones est due, pour Siegel, au fait que l'hexagone est une projection dans le plan du dodécaèdre, qu'on peut facilement approximer par une sphère pour les calculs. On peut également faire l'hypothèse que cette représentation était plus adaptée à la diffusion, l'hexagone permettant un pavage régulier d'un espace à 2D autrement qu'avec des triangles ou des carrés.

vortex » comme une « hypothèse probable ». ²⁷ Il manifeste à plusieurs reprises sa volonté de détecter ces vortex, et va jusqu'à décrire des expériences dans ce but. Même s'il ne réalise pas ces expériences, il garde en tête la possibilité de détection. Concernant un autre élément de sa théorie en revanche la conception de Maxwell est plus réservée. Les fameuses *idle wheels*, si elles permettent des preuves mathématiques solides, ne peuvent pas pour Maxwell « être mises en avant comme un mode de connexion existant dans la nature ». ²⁸ Maxwell conçoit leur utilisation comme « temporaire ». Pour expliquer cette faible conviction, Siegel avance le fait que Maxwell, comme Faraday, croit avant tout en la réalité du champ. Or ces *idle wheels* représentent une sorte de « fluide électrique » ou de « particules électriques » qui n'entrent pas dans le raisonnement de Faraday. ²⁹

27. Siegel 1991, p. 40.

28. *Ibid.*, p. 41. Cite Maxwell.

29. *Ibid.*

2.4 *Exegi monumentum*

Les équations de Maxwell

Les travaux de Maxwell sont surtout restés célèbres pour les résultats auxquels le physicien britannique est parvenu. Ainsi, les « équations de Maxwell » naissent dans le mémoire de 1861. Trois relations sont présentes dans la deuxième partie de ce mémoire. À chaque fois, Maxwell compare les relations tirées du modèle aux lois expérimentales pour consolider les liens de son analogie. La première relation est établie lorsque des vortex (comme Maxwell, nous parlerons plutôt dans la suite de « cellules ») consécutifs ont des vitesses différentes. Sur la figure 2.3, la vitesse est prise selon l'axe z . Dans le cas d'un différentiel des vitesses, les billes auront un mouvement selon x . En adoptant la notation \mathbf{H} pour la vitesse circumférentielle, et avec \mathbf{j} le flux de billes on a $j_x = \partial_y H_z$.

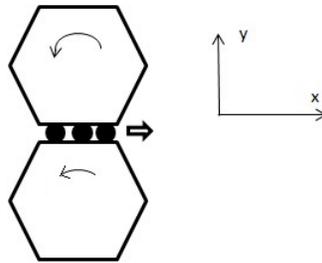


FIGURE 2.3 – Exemple de mouvement des particules.

En généralisant à trois dimensions, on obtient dans le système d'unité adéquat :

$$\nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{j} \quad (2.3)$$

On soulignera également que cette relation entre le courant électrique et l'excitation magnétique est purement cinématique, et ne fait donc pas intervenir de conditions sur la forme des cellules ou les actions de contact billes-cellules. En rapprochant cette loi de la loi d'Ampère $\nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{J}$, où \mathbf{J} est le courant électrique, et ayant en mémoire l'analogie entre vitesse et force magnétique, on en déduit celle entre flux de billes \mathbf{j} et courant électrique \mathbf{J} .³⁰

30. Insistons sur le fait que, même s'il se base sur les résultats du Français, c'est Maxwell qui formule la « loi d'Ampère » telle que nous la connaissons, et qui pose que le travail subit par un pôle magnétique unité selon un trajet donné correspond à la valeur de l'intensité multipliée par l'angle solide sous lequel on voit le fil (soit 4π si le chemin embrasse le fil, où nul sinon). Sur ce point voir Darrigol 2000 (b), p. 142.

L'autre relation qu'on peut déterminer dérive du théorème du moment cinétique appliqué à une cellule.³¹ En notant \mathbf{T} la force tangentielle appliquée à une cellule, le couple résultant $\nabla \wedge \mathbf{T}$ est égal à la dérivée du moment cinétique angulaire, proportionnel à $\mu\mathbf{H}$. D'après la loi des actions réciproques, si $\boldsymbol{\tau}_1$ désigne la force exercée par la cellule sur les particules ($\boldsymbol{\tau}_1 = -\mathbf{T}$), on a :

$$\nabla \wedge \boldsymbol{\tau}_1 \propto -\frac{\partial \mu\mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.4)$$

Le coefficient de proportionnalité (égal à 1) est déterminé en utilisant la conservation de l'énergie. Encore une fois, c'est la comparaison avec la loi d'induction de Faraday qui permet de compléter l'analogie. Sous sa forme différentielle, la loi donne : $\nabla \wedge \mathbf{E} \propto -\frac{\partial \mu\mathbf{H}}{\partial t}$, avec \mathbf{E} la force électromotrice, ce qui permet d'identifier la force $\boldsymbol{\tau}_1$ qui meut les billes avec la force électromotrice \mathbf{E} . Maxwell introduit également le vecteur \mathbf{A} défini par $\mu\mathbf{H} = \nabla \wedge \mathbf{A}$ qui lui permet de réécrire la loi d'induction de Faraday et de montrer que $\mu\mathbf{H}$ a une divergence nulle.

Cellules et électrostatique

En janvier 1862, Maxwell publie sa troisième partie, dans laquelle il explique les phénomènes électrostatiques et les contraintes électriques dans les milieux. Poursuivant son objectif de donner une théorie plus cohérente de l'électrodynamique, et de donner une explication des phénomènes lumineux, Maxwell ajoute un nouvel élément à son modèle : la déformation des cellules.³²

En supposant que les cellules aient un comportement élastique, la force $-\mathbf{E}$ que les billes appliquent sur celles-ci crée une contrainte de cisaillement, et donc une déformation $\boldsymbol{\delta}$ telle que pour une petite déformation (effets linéaires) on a $\boldsymbol{\delta} = -\epsilon\mathbf{E}$, où ϵ est le coefficient d'élasticité. La cellule subissant une déformation, elle entraîne un « déplacement » — nous reviendrons sur ce terme — des billes qui sont à son contact. Maxwell commet d'ailleurs une erreur d'interprétation en considérant que le nouveau « courant de déplacement » $\frac{\partial \boldsymbol{\delta}}{\partial t}$ est une composante du courant de conduction. Ce qui amène à :

31. Le théorème du moment cinétique, théorème de base de la mécanique, donne que pour un corps de moment cinétique \mathbf{L} soumis à une somme de moments \mathbf{M} on a : $\mathbf{M} = \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial t}$. Soulignons que pour la bonne application de ce théorème les moments cinétiques et moments de force doivent être considérés au même point.

32. Dans cette partie et la suivante, Maxwell utilise exclusivement le terme de « cellules » (*cells*) au lieu de « vortex », et considère qu'elles sont solides. La conception d'élasticité dans un vortex fluide pose en effet problème.

$$\mathbf{j} = \nabla \wedge \mathbf{H} + \frac{\partial \boldsymbol{\delta}}{\partial t} \quad (2.5)$$

En prenant la divergence de l'équation 2.5, on retrouve la conservation de la charge à condition que :

$$\rho = -\nabla \cdot \boldsymbol{\delta} \quad (2.6)$$

Maxwell modifiera cette conception du courant de déplacement, comme nous le verrons par la suite.³³

Les vortex et la lumière

Dans la suite de ce mémoire, Maxwell aborde un point fondamental de son raisonnement, et que nous évoquerons régulièrement : le lien entre vitesse des perturbations et rapport des unités. D'un point de vue moderne, les courants de déplacement jouent un rôle fondamental pour décrire la propagation des phénomènes électriques et magnétiques, car c'est ce terme supplémentaire qui permet d'obtenir une équation d'onde de la forme $\Delta \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0$. En partant de ses relations et en établissant une telle équation d'onde, Maxwell aurait pu trouver une expression pour la vitesse de propagation des perturbations. Mais ce n'est pas la démarche qu'il a suivie, et à aucun moment il n'écrit d'équation d'onde dans le mémoire « *On Physical Lines of Force* ».

Dans l'analyse qu'il fait de ce mémoire, Daniel Siegel avance deux justifications pour ces choix.³⁴ D'une part, ce raisonnement revient à considérer que les courants de déplacement agissent comme un terme source pour la force magnétique. Si cette conception est aujourd'hui acceptée, elle est à contre-courant des idées de Maxwell, qui accorde la primauté aux forces, dont découlent les courants.³⁵ La seconde raison concerne le rôle du milieu et la nature de la perturbation, que nous détaillerons dans la dernière partie de ce chapitre. Le raisonnement de Maxwell est donc bien différent de celui qui se base sur les équations, et il fait intervenir les différents paramètres de son modèle. Nous donnons ici un résumé de sa démarche, et

33. Cette erreur de conception sur le courant de déplacement n'a pas d'incidence sur l'équation d'onde déduite par Maxwell, car il a pris un coefficient de proportionnalité négatif entre $\boldsymbol{\delta}$ et \mathbf{E} . Elle est néanmoins sensible dans l'équation de conservation de la charge ci-dessus, ainsi que dans l'équation de Poisson. Sur ce point voir aussi Darrigol 2000 (b), p. 161.

34. Siegel 1991, pp. 120-143.

35. Siegel 1991., p. 126-7.

nous laissons le lecteur se reporter à l'ouvrage de Siegel mentionné ci-dessus pour plus de précisions.

Maxwell détermine dans un premier temps l'expression des forces d'après son modèle. Il calcule d'une part la force « électrostatique », comme étant celle que deux charges électriques séparées d'une distance unitaire exercent l'une sur l'autre à cause de leurs charges. D'autre part, il calcule la force « électromagnétique », qui est celle que ces deux mêmes charges, mises en mouvement (et constituant donc des courants), vont exercer l'une sur l'autre lorsqu'elles se déplacent pendant une unité de temps dans des conducteurs séparés d'une unité de distance. Notons R le rapport de la force électrostatique sur la force électromagnétique. Les forces étant quadratiques par rapport aux charges (comme dans la loi de Coulomb), à distance égale, le rapport de la charge électrostatique sur la charge électromagnétique sera égal à \sqrt{R} .

Ce rapport tient, pour les scientifiques continentaux du milieu du XIXe siècle, une place importante dans la théorie. Weber exprime les interactions entre charges (qu'elles soient statiques ou dynamiques) selon une loi dépendant de la vitesse. Il effectue en 1856 des expériences avec Rudolf Kohlrausch pour déterminer les forces que deux charges exercent l'une sur l'autre selon qu'elles sont immobiles ou en mouvement. Il calcule le rapport de la charge électrostatique par la charge électromagnétique (ou, ce qui revient au même, l'unité électromagnétique par l'unité électrostatique) et trouve une valeur pour ce paramètre \sqrt{R} de $3,1074 \cdot 10^8$ m/s.³⁶

Mais comment Maxwell peut-il relier ce rapport aux paramètres mécaniques de son modèle ? Le raisonnement que donne le Britannique, qui fait intervenir plusieurs facteurs numériques, est long. Nous donnerons simplement les étapes, en nous basant sur le bilan qu'en fait Siegel : dans l'analogie que donne Maxwell, la force magnétique dans le milieu correspond à une vitesse et dépend de la masse volumique μ , qui apparaît dans l'équation 2.2 ; la force électrique, elle, est inversement proportionnelle au paramètre ϵ qui correspond au coefficient d'élasticité des cellules. Le rapport de la force électrostatique sur la force électromagnétique est donc de l'ordre de $1/(\epsilon\mu)$, et le rapport de l'unité électromagnétique sur l'unité électrostatique est de l'ordre de $1/\sqrt{\epsilon\mu}$.³⁷

Dans le cas d'un solide élastique, cette grandeur est justement la vitesse de propagation d'une onde transverse. Maxwell utilise la valeur de la vitesse de la lumière déterminée par

36. Siegel 1991, p. 123. Le fait que ce paramètre a la dimension d'une vitesse est justifié dans la théorie de Weber en considérant que deux charges statiques interagissent par leur charge simplement, et deux charges dynamiques par leur charge et leur vitesse. Weber et Kohlrausch déterminent ce paramètre dans un autre système d'unité, qui introduit un facteur $\sqrt{2}$, que nous ne détaillerons pas ici. Pour des précisions sur les systèmes d'unité voir Darrigol 2000 (b), p. 399.

37. Siegel 1991, p. 130-3.

Fizeau lors de ses expériences de 1849 et 1850 (voir Annexe n°3), qu'il compare au rapport des unités donné par les expériences de Weber et Kohlrausch. Il trouve un écart de 1,3% entre les deux grandeurs. Sa conclusion est alors l'identification du milieu de propagation de la lumière et de celui causant les phénomènes électrique et magnétique (voir page 438).

Les courants de déplacement et l'électricité chez Maxwell

Outre la difficulté inhérente à la théorie des vortex de Maxwell, la diffusion de celle-ci a été freinée par certains contre-sens faits par les lecteurs du savant britannique. En particulier, la conception de l'électricité fut un point difficile. Comme nous l'avons signalé plus haut, Maxwell ne croyait pas en l'existence de ces *idle wheels*, mais celles-ci lui permettaient d'obtenir les lois de l'électricité, qui se comportait d'après lui *comme* un fluide incompressible. Si Maxwell se bornait à l'analogie, beaucoup de ses lecteurs ont voulu y voir une identité, et ont cherché à considérer l'électricité en tant que fluide réel.

Il en est de même pour la notion de « déplacement » ou de « courant de déplacement » (*displacement current*). Pour Maxwell, ce terme de « déplacement » signifiait un mouvement de l'électricité à l'intérieur du milieu, ce qui donnait naissance à un début de courant, mais en aucun cas à un mouvement de la cellule dans son ensemble. Whittaker souligne que ce terme de « déplacement » peut prêter à confusion et préfère voir ce phénomène comme un changement de structure. Concernant la charge électrique, en reprenant l'équation 2.6 on constate qu'elle est due à une non-uniformité du déplacement électrique, qui apparaît à la limite entre un milieu conducteur et un autre non-conducteur.³⁸

Les fondations dynamiques

Depuis son mémoire de 1861, Maxwell utilise le vecteur \mathbf{A} qu'il considère comme l'équivalent mathématique de l'état électro-tonique de Faraday.³⁹ Dans la théorie dynamique qu'il construit trois ans plus tard, Maxwell lui donne le rôle d'impulsion (au sens lagrangien) pour le champ électromagnétique. Cette approche a en fait un intérêt majeur. Elle permet en effet de s'émanciper des mécanismes sous-jacents :⁴⁰

38. Whittaker 1910, p. 280.

39. Maxwell ne considérera le vecteur \mathbf{A} comme un potentiel qu'en 1868, après l'ajout d'une jauge. Voir plus loin.

40. Darrigol 2000 (b), p. 157.

[Maxwell] réalisa que cette interprétation était essentiellement indépendante de tout mécanisme spécifique et pouvait être utilisée comme une fondation plus abstraite pour la dynamique du champ magnétique. Il admit simplement que, via un mécanisme de liaison non spécifié, l'existence d'un courant électrique impliquait un mouvement dans le champ environnant.

Dans un mémoire intitulé « *Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* » qu'il écrit en 1864 (le mémoire est officiellement publié en 1865), Maxwell jette les bases de ce qui deviendra une théorie complète, utilisant le formalisme lagrangien sans référence à un quelconque modèle mécanique. Nous montrerons par la suite que ce mémoire est important en France, car il est celui auquel les physiciens se réfèrent lorsqu'ils parlent des débuts de la théorie électromagnétique de la lumière. En partant des lois de l'induction, Maxwell établit les relations pour deux systèmes de courants i_1 et i_2 :⁴¹

$$\begin{cases} e'_1 - R_1 i_1 = \frac{d}{dt}(L_1 i_1 + M i_2) \\ e'_2 - R_2 i_2 = \frac{d}{dt}(L_2 i_2 + M i_1) \end{cases} \quad (2.7)$$

où e'_k représente la tension du générateur (pour le circuit $k = 1$ ou 2), R_k la résistance du circuit, L_k l'inductance propre et M l'inductance mutuelle.⁴² En prenant ces coefficients d'inductance constants, le bilan d'énergie peut s'établir en multipliant les équations par i_k , soit :⁴³

$$e'_1 i_1 + e'_2 i_2 = R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2 \right) \quad (2.8)$$

Les deux premiers termes de droite représentent l'énergie perdue par effet Joule, et le terme dans la dérivée est ce que Maxwell appelle « l'énergie intrinsèque des courants ». ⁴⁴ En notant T cette énergie, les équations 2.9 peuvent s'écrire :⁴⁵

41. Voir : Maxwell 1865.

42. L'inductance propre d'une bobine est définie par la relation $\Phi = Li$, où i est le courant traversant un circuit et Φ le flux magnétique (flux de \mathbf{B}) induit à travers ce même circuit. L'inductance mutuelle est définie pour deux circuits 1 et 2 par la relation $\Phi_2 = M i_1$, où i_1 est l'intensité traversant le circuit 1 et Φ_2 le flux magnétique créé par le circuit 1 dans le circuit 2. On a de même $\Phi_1 = M i_2$.

43. Les coefficients L_k et M sont pris constants pour simplifier le raisonnement. Cela signifie simplement que la position (notamment la forme) relative des circuits ne varie pas.

44. Maxwell 1865, p. 470. Voir également : Darrigol 2000 (b), p. 156-60.

45. Maxwell n'utilise pas explicitement les équations de Lagrange dans son mémoire de 1865. Il le fera dans son *Treatise* en 1873.

$$\begin{cases} e'_1 - R_1 i_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial i_1} \\ e'_2 - R_2 i_2 = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial i_2} \end{cases} \quad (2.9)$$

Dans le formalisme lagrangien, la quantité $p_1 = L_1 i_1 + M i_2$ correspond à l'impulsion associée à la vitesse généralisée i_1 (c'est-à-dire $p_1 = \frac{\partial L}{\partial i_1}$, où L est le lagrangien du système). Maxwell pose simplement que cette quantité est l'*impulsion électromagnétique* pour le circuit 1.⁴⁶ Avec cette nouvelle quantité, l'interprétation de Maxwell est largement modifiée :⁴⁷

Avec l'interprétation en terme d'impulsion, le potentiel vecteur devint le concept central dans la théorie de Maxwell. La force électromotrice induite était simplement la dérivée temporelle de l'impulsion réduite. Maxwell supposa plus tard que l'impulsion du circuit était la circulation de cette impulsion électromagnétique \mathbf{A} .

Ce qui mène, en intégrant sur le circuit électrique, à :

$$\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$$

Maxwell généralise l'expression de l'énergie intrinsèque des courants, en posant :

$$T = \frac{1}{2} \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} dV$$

où $\mathbf{J} = \nabla \wedge \mathbf{H}$ est le courant total. En utilisant les vues de Faraday sur l'induction, Maxwell prend également pour l'induction magnétique $\mathbf{B} = \nabla \wedge \mathbf{A}$. Ces expressions lui permettent de reformuler l'énergie électromagnétique :⁴⁸

$$T = \frac{1}{2} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV$$

Dans son mémoire de 1865, Maxwell revient également sur sa conception du déplacement \mathbf{D} , qu'il rattache à la polarisation dans les diélectriques, comme Faraday : le « courant de déplacement » est vu comme un transfert de la polarisation. La force nécessaire pour établir un déplacement \mathbf{D} doit être proportionnelle à celui-ci, soit $\mathbf{E} = \mathbf{D}/\epsilon$. De plus, Maxwell

46. « we shall *assume* that the electromagnetic momentum », Maxwell 1865, p. 469. L'accentuation est nôtre.

47. Darrigol 2000 (b), p. 159-60.

48. *Ibid.* La seconde expression est obtenue à partir de la première en faisant une intégration par partie sur tout l'espace.

considère ce courant supplémentaire, non comme une composante du courant de conduction, mais comme une composante du courant total rotationnel. On a ainsi :

$$\nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.10)$$

Les conséquences sont d'ailleurs bien plus importantes que l'équation obtenue, car avec cette hypothèse, Maxwell considère que tout courant total est fermé, c'est-à-dire à divergence nulle. C'est même une hypothèse fondamentale car « le raisonnement dynamique de Maxwell implique la restriction aux courants fermés, car dans ce cas seulement le champ magnétique est entièrement déterminé par les courants ». ⁴⁹

Maxwell s'intéresse également à la propagation du potentiel vecteur \mathbf{A} , qu'il sera amené à reconsidérer en 1868 — notamment par l'ajout d'une jauge $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$. ⁵⁰ De la même façon, il reconsidèrera le problème du déplacement électrique. En effet, d'après la théorie de la polarisation de Mossotti, ⁵¹ dominante à l'époque, la densité de charge liée à une polarisation \mathbf{D} est : $\rho = -\nabla \cdot \mathbf{D}$. Cette expression entre en contradiction avec la conservation de la charge, puisqu'on obtiendrait avec cette hypothèse (en prenant la divergence de l'équation 2.10) : $\nabla \cdot \mathbf{j} = -\frac{\partial \nabla \cdot \mathbf{D}}{\partial t} = +\frac{\partial \rho}{\partial t}$. Maxwell résout le problème en supposant, comme Faraday, que le concept de polarisation est supérieur au concept de charge. Par conséquent, la charge électrique est définie comme une inhomogénéité de la polarisation.

La théorie complète sera présentée quelques années plus tard dans son œuvre principale parue en 1873 : *Treatise on Electricity and Magnetism* (précisons notre notation : par la suite nous désignerons simplement ce livre par le *Treatise* de Maxwell, nous gardons exceptionnellement le terme anglais pour le différencier de la traduction française, que nous évoquerons plus tard). Nous ne détaillerons pas la démarche calculatoire que Maxwell a eue dans l'établissement de sa théorie dynamique. Néanmoins, cet ouvrage est celui qui se répand dans les cercles scientifiques, notamment en France, où il est la source principale pour ceux qui enseignent Maxwell en particulier dans les établissements de l'enseignement technique supérieur. Aussi, nous rappelons simplement les grandes lignes de ce qui y est exposé.

La rédaction du *Treatise* est entreprise par Maxwell dès 1867. Son objectif avoué est d'écrire un ouvrage de référence sur l'électromagnétisme, et de pallier ainsi un manque : ⁵²

49. Darrigol 2000 (b), p. 161.

50. Voir sur ce point Darrigol 2000 (b), p. 163.

51. Ottaviano-Fabrizio Mossotti (1791-1863).

52. Maxwell 1873, p. ix. Aussi dans Darrigol 2000 (b), p. 166.

Il existe plusieurs traités de vulgarisation dans lesquels les phénomènes électriques et magnétiques sont décrits. Ce n'est cependant pas ce qui est souhaité par ceux qui ont été confrontés à des quantités à mesurer, et dont l'esprit ne se satisfait pas d'expériences d'illustration.

Il y a également une masse considérable de mémoires mathématiques qui sont de grande importance pour la science électrique, mais ils restent enfouis dans les volumineuses revues des sociétés savantes ; ils ne forment pas un système unifié ; ils sont de niveaux très inégaux et sont pour la plupart incompréhensibles sauf pour des mathématiciens déclarés.

J'ai donc pensé qu'un traité serait utile, qui aurait pour objectif principal de reprendre le sujet entier selon une approche méthodique, et qui indiquerait également comment chaque questionnement est amené à être vérifié par les moyens actuels de mesure.

Maxwell reprend les principales caractéristiques de la théorie du champ qu'il a construite à partir des idées de Faraday. La primauté est donnée au champ électro-magnétique. Les concepts de charge et de courant électrique sont dérivés du concept de polarisation. La charge est une inhomogénéité de la polarisation, le courant en est une variation (dérivée temporelle dans le cas d'un diélectrique, expression plus complexe qui dépend des mécanismes microscopiques dans un conducteur, à traiter empiriquement avec la loi d'Ohm $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$). Le champ magnétique est toujours fermé, en accord avec l'idée des lignes de force de Faraday.⁵³ Maxwell refuse d'éliminer le potentiel vecteur \mathbf{A} , lui donnant toujours une signification physique. Ce pas sera franchi par ses successeurs comme nous le verrons plus loin.

2.5 Maxwell et l'éther

Nous terminerons cette approche de l'œuvre de Maxwell en discutant le rôle fondamental qui est donné au milieu de propagation. Celui-ci intervient vraiment à partir du mémoire de 1861, où Maxwell met en jeu les actions mécaniques des différentes composantes du milieu. Comme nous l'avons détaillé plus haut, son objectif initial est clair : décrire les phénomènes magnétiques et électriques selon des contraintes dans un certain milieu. De la même façon, c'est l'introduction de la déformation des cellules qui permet à Maxwell d'arriver à une théorie électromagnétique de la lumière, et les quantités ϵ et μ (permittivité et perméabilité) sont reliées directement aux caractéristiques mécaniques de son milieu imaginaire (masse volu-

53. Pour un rappel des différentes équations voir Annexe 12.2.

mique, élasticité). Dans son mémoire de 1861, Maxwell identifie uniquement le milieu de la lumière comme étant celui des perturbations électriques et magnétiques :⁵⁴

La vitesse des ondulations transverses dans notre milieu hypothétique, calculée à partir des expériences électro-magnétiques de MM. Kohlrausch et Weber, s'accorde si exactement avec la vitesse de la lumière calculée à partir des expériences optiques de M. Fizeau que nous pouvons difficilement éviter l'inférence que *la lumière consiste en des ondulations du même milieu que celui qui est la cause des phénomènes électriques et magnétiques.*

De même qu'il ne donne pas d'équation d'onde, à aucun moment Maxwell ne dit dans ce premier mémoire que la lumière *est* un phénomène électromagnétique. Nous avons déjà évoqué le rôle des courants de déplacement, que Maxwell considère comme une conséquence des forces, et non l'inverse. L'autre raison concerne les idées de Maxwell sur la lumière, que Siegel décrit comme « traditionnelles du XIXe siècle », la lumière consistant en des ondes transverses mécaniques. Ces ondes entraînent des mouvements du milieu sur une certaine distance (la longueur d'onde). Or, pour Maxwell, les forces électrique et magnétique correspondent à des mouvements locaux du milieu, au niveau de chaque cellule. Par conséquent, la lumière ne peut pas être exactement de même nature que ces forces, mais elle peut se propager dans le même milieu.

Nous pouvons ici préciser un point : bien que Maxwell soit, à l'inverse de Thomson, plutôt partisan d'un éther fluide, il considère des ondes transverses se propageant dans un milieu élastique pour calculer la vitesse des ondes dans son milieu (or les ondes transverses ne peuvent pas se propager dans un fluide). Lorsque Siegel nous dit que l'éther est modifié sur une longueur grande devant la taille des cellules, il faut probablement considérer que la longueur est suffisamment faible pour que le caractère élastique des cellules soit sensible. Notons que le problème de la transversalité des ondes et de l'électricité est étudié depuis longtemps, puisqu'il avait déjà été abordé au XVIIIe siècle par le physicien Johann II Bernoulli :⁵⁵

Johann II fut également actif sur ces question [de mouvement des plaques vibrantes] et donne la première théorie des oscillations transversales de l'éther, c'est-à-dire du fluide responsable de la transmission de l'électricité, ce qui en fait un précurseur important de Maxwell.

54. Maxwell 1861, part. III, p. 22. L'accentuation est de Maxwell.

55. Blay et Halleux 1998, p. 195. Johann II Bernoulli (1710-1790) est le frère de Daniel Bernoulli, célèbre pour ses travaux sur les probabilités et l'hydrodynamique.

Lorsque Maxwell procure une fondation dynamique à sa théorie, il commence par justifier l'appellation de « champ électromagnétique » : « J'ai donc préféré chercher une explication des faits [...] en supposant qu'ils sont produits par des actions qui ont lieu dans le milieu environnant autant que dans les corps excités », avant de montrer que la matière ne peut pas être le milieu de propagation pour la lumière ou la chaleur (en arguant des résultats des observations faites dans des tubes à vide). Pour lui, la seule explication possible réside dans l'existence d'un milieu éthéré :⁵⁶

Nous avons donc quelque raison de croire, à partir de la propagation de la lumière et de la chaleur, qu'il y a un milieu éthéré emplissant l'espace et pénétrant les corps, capable d'être mis en mouvement et de transmettre ce mouvement d'un endroit à un autre, et de communiquer ce mouvement à la matière ordinaire pour la chauffer et l'affecter de différentes manières.

Un peu plus loin, Maxwell détaille le rôle de ce milieu pour les phénomènes électriques et magnétiques :⁵⁷

Il apparaît ainsi que certains phénomènes électriques ou magnétiques mènent à la même conclusion que les phénomènes optiques, celle de l'existence d'un milieu éthéré pénétrant tous les corps, et modifié uniquement en partie par leur présence ; que les parties de ce milieu peuvent être mises en mouvement par des courants électriques ou des aimants ; que ce mouvement est communiqué d'une portions à une autre de ce milieu par l'intermédiaire de forces existant aux connexions ces portions ; que sous l'action de ces forces il y a une certaine déformation dépendant de l'élasticité de ces connexions ; et qu'ainsi l'énergie peut exister sous deux formes distinctes dans le milieu, l'une étant l'énergie factuelle du mouvement de ces portions, et l'autre l'énergie potentielle contenue dans les connexions, de par leur élasticité.

Cette prédominance du milieu de propagation au sein de la théorie électromagnétique sera toujours visible dans son *Treatise*, où Maxwell utilise surtout des raisonnements énergétiques, et considère que les actions sont dues à des contraintes dans le milieu, comme en témoigne le titre de son chapitre XI « *Energy and stress* ». Une difficulté subsiste néanmoins dans l'ouvrage de Maxwell, le lien entre éther et matière ordinaire :⁵⁸

56. Maxwell 1865, p. 460.

57. *Ibid.*, p. 464.

58. Darrigol 2000 (b), p. 170. Cette difficulté dans le *Treatise*, s'étendait à toute la question des méca-

[Maxwell] était conscient que sa théorie était surtout incomplète dans son traitement de la relation entre éther et matière. La description générale de la polarisation diélectrique et magnétique, ainsi que l'idée de courants contrôlant un mécanisme caché, impliquaient que l'éther et la matière se comportassent comme un unique milieu avec une capacité inductive, une perméabilité et une conductivité variables.

L'idée d'un éther omniprésent, ne s'étendant pas uniquement au domaine de l'électromagnétisme, se retrouve également dans l'article « Éther » que Maxwell écrit un an avant sa mort pour l'*Encyclopedia Britannica* en 1878. L'éther y est, pour lui, « une substance matérielle plus subtile que les corps visibles, dont l'existence est supposée dans ces portions de l'espace qui sont apparemment vides ». ⁵⁹ Dans cet article, Maxwell réunit sous la bannière de l'éther ce qu'il considère comme les « rayonnements » (*radiations*), que ceux-ci soient lumineux, calorifiques (rayonnement IR), ou chimiques (rayonnement UV) : ⁶⁰

Tout ce qui a été dit par rapport aux rayonnements qui affectent nos yeux, et que nous appelons lumière, s'applique aussi à ces rayonnements qui ne produisent pas d'impression lumineuse sur nos yeux, pour les phénomènes d'interférence qui ont été observés, et pour les longueurs d'onde mesurées, dans le cas des rayonnements qui peuvent être détectés seulement par leur effets caloriques ou par leurs effets chimiques. [...] Ayant ainsi déterminé les caractéristiques mathématiques de la propagation, nous devons maintenant tourner notre attention vers le milieu dans lequel elle prend place. Nous pouvons utiliser le terme *éther* pour nommer ce milieu, *quoi qu'il puisse être*.

Maxwell donne ensuite les propriétés principales de l'éther, en justifiant par le calcul : une masse volumique de $1,02 \cdot 10^{-16} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et une élasticité (module de cisaillement) de 95,5 Pa. ⁶¹ Outre ces valeurs largement différentes des corps ordinaires, Maxwell observe que l'éther est distinct des milieux transparents ordinaires : l'air ne peut pas transmettre de vibrations mécaniques transverses, et même les solides comme le verre ou le cristal ne transmettent pas de vibrations mécaniques de fréquence aussi élevée. Enfin, concernant la constitution de l'éther, c'est pour Maxwell un milieu discontinu. Il se réfère en ce sens à la

nismes sous-jacents, pour lesquels il était nécessaire de faire intervenir la structure moléculaire de la matière (notamment pour expliquer la dispersion anormale).

59. Maxwell 1878, p. 763.

60. *Ibid.*, p. 766-7. Les accentuations sont nôtres.

61. À titre de comparaison les valeurs pour l'acier sont (resp.) : environ $8000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et 79,3 GPa. Source : Crandall, Dahl, Lardner 1959.

théorie des vortex de Thomson, qui permet de décrire un milieu parfaitement homogène sous la forme d'un ensemble de vortex moléculaires.

Le point le plus discuté par Maxwell reste le mouvement relatif de l'éther. Il justifie les difficultés à mettre en évidence ce mouvement avec les moyens expérimentaux à cause de la trop grande vitesse des perturbations, et mentionne les expériences du prisme d'Arago et celle de Fizeau sur les interférences dans l'eau (voir : Annexe n°3 p. 439). Il juge de manière lucide :⁶²

Cette expérience [de Fizeau] semble plutôt vérifier la théorie de [l'entraînement partiel] l'éther de Fresnel ; mais l'entière question de l'état du milieu luminifère près de la Terre, et de son lien avec la matière ordinaire, est très loin d'être résolue par l'expérience.

C'est d'ailleurs sur cette question de la présence de l'éther dans le milieu interplanétaire qu'il conclut son article :⁶³

Quelles que soient les difficultés que nous pouvons rencontrer pour avoir une idée cohérente de la constitution de l'éther, il n'y a aucun doute que les espaces interplanétaires et interstellaires ne sont pas vides, mais sont occupés par une substance ou un corps matériels, qui est sans aucun doute le plus vaste, et vraisemblablement le plus uniforme des corps que nous connaissons.

Conclusion

Entre 1855 et 1873, James Clerk Maxwell a posé les bases de la théorie classique de l'électromagnétisme. Partant d'une idée de Faraday, attribuant le rôle principal au champ environnant les conducteurs, Maxwell construit un milieu mécanique formé de cellules pour rendre compte des différents phénomènes observés. Utilisant l'analogie dans un premier temps, Maxwell arrive, étape par étape, à un modèle cohérent qui lui permet notamment d'identifier le milieu de propagation des perturbations électromagnétiques à l'éther luminifère. Il dote ensuite sa théorie d'une fondation dynamique, tout en conservant l'éther comme le siège de la propagation des forces électriques et magnétiques. Son ouvrage majeur, le *Treatise*, sera traduit en français en 1885.⁶⁴ Ses travaux seront repris par plusieurs physiciens britanniques qui continueront de bâtir la « théorie de Maxwell ».

62. *Ibid.*, p. 770.

63. *Ibid.*, p. 775.

64. Voir : Maxwell 1885.

Chapitre 3

Les Maxwellliens et la gestion de l'héritage

Ether is a very wonderful thing.
It may exist only in the
imagination of the wise, being
invented and endowed with
properties to suit their
hypotheses ; but we cannot do
without it.

Heaviside

Les travaux de Maxwell ont une grande influence sur la génération suivante de physiciens britanniques. Au début des années 1880 le *Treatise* de Maxwell devient une étape obligatoire dans l'apprentissage de la physique victorienne. Parmi les principaux promoteurs de la théorie de Maxwell on trouve FitzGerald, Lodge et Heaviside, désignés notamment par l'historien Bruce Hunt comme les « Maxwellliens ». ¹ Ce sont eux qui vont, dans une large mesure, mettre en avant la théorie de Maxwell dans les milieux scientifiques, et la modeler pour lui attribuer la forme actuelle.

Georges FitzGerald, leader de ce mouvement, devient le promoteur de modèles théoriques de l'éther, tenant la comparaison avec d'autres courants comme le solide élastique de William Thomson. Oliver Lodge se construit une renommée, pour le bon et le moins bon, tant grâce à ses expériences poussées que pour ses modèles mécaniques parfois trop nombreux et éparses, qui lui valent plusieurs critiques. Enfin, Oliver Heaviside, personnage atypique de la physique britannique de la fin du XIXe siècle, ouvre la voie à un courant divergent : la prédominance des équations par rapport au modèle mécanique de l'éther.

1. Hunt 1991.

3.1 FitzGerald et la théorie de Maxwell

Des apports considérables

Georges Francis FitzGerald (1851-1901) fait ses études universitaires au *Trinity College* de Dublin, comme l'avaient fait avant lui Rowan Hamilton et James MacCullagh notamment. Très influencé par ce dernier, FitzGerald étudie attentivement ses travaux sur les théories de l'éther optique et des phénomènes optiques dans les cristaux. En particulier, il reconnaît que, si les équations de MacCullagh ont souffert d'un manque de rigueur mathématique, elles n'en sont pas moins remarquables : « Bien que mal fondées [...] elles étaient bien trouvées ». ² Afin d'avoir une meilleure compréhension physique de cette théorie, il se tourne rapidement vers la théorie de Maxwell. Il lit le *Treatise*, en ajoutant des notes qui reflètent l'évolution de sa pensée tout au long de la lecture. En particulier, l'une de ces notes porte sur la possibilité de combiner la théorie de Maxwell et celle de James MacCullagh. Cette fusion envisagée a notamment pour effet d'ouvrir un pan que Maxwell avait éludé : une théorie électromagnétique de la réflexion et de la réfraction de la lumière. Elle ouvre également la possibilité de pouvoir relier la théorie de Maxwell aux anciens modèles d'éther comme solide élastique. ³

En 1839, James MacCullagh (1809-1847), mathématicien irlandais, avait choisi de se baser sur un éther élastique dont les conditions aux limites seraient les conditions de Fresnel pour les intensités réfléchies et réfractées. ⁴ En notant $\boldsymbol{\xi}$ la torsion locale du milieu et ϵ le coefficient d'élasticité, le potentiel s'exprime alors comme $\frac{1}{2}\epsilon(\nabla \wedge \boldsymbol{\xi})^2$. Utilisant le principe de moindre action, MacCullagh en tira l'équation du mouvement dans le milieu, qui s'exprime par :

$$\mu \frac{\partial^2 \boldsymbol{\xi}}{\partial t^2} = -\nabla \wedge \left(\frac{1}{\epsilon} \nabla \wedge \boldsymbol{\xi} \right) \quad (3.1)$$

où μ est la masse volumique du milieu. Les deux conditions aux limites portent alors sur la continuité de $\boldsymbol{\xi}$ et celle de $\frac{1}{\epsilon} \nabla \wedge \boldsymbol{\xi}$.

2. Hunt 1991, p. 11. Cite FitzGerald. La citation originale est : « Even if not well founded [...] they were well found ». On appréciera l'assonance, difficilement transposable en français.

3. *Ibid.*

4. Voir Darrigol 2012, p. 212. Dans une annexe à son mémoire sur la polarisation chromatique de 1821, Fresnel donne les formules pour les intensités réfléchie et transmise à l'interface entre deux milieux. Lorsque l'onde est polarisée perpendiculairement au plan d'incidence, Fresnel montre que l'intensité réfléchie est : $I_r = I_0 \left(\frac{\tan i - \tan r}{\tan i + \tan r} \right)^2$, où i et r sont resp. les angles d'incidence et de réfraction. Pour une onde polarisée dans le plan d'incidence, Fresnel donne l'intensité réfléchie : $I_r = I_0 \left(\frac{\sin 2i - \sin 2r}{\sin 2i + \sin 2r} \right)^2$. L'onde incidente peut toujours être décomposée comme une somme de deux ondes polarisées selon les deux cas évoqués. Dans les deux cas, l'intensité transmise se déduit par $I_t = I_0 - I_r$ (conservation de l'énergie).

Cette équation excluait intrinsèquement la propagation d'ondes longitudinales. Elle entraînait également en contradiction partielle avec la théorie du solide élastique de George Green (1793-1841). En effet, le solide de MacCullagh correspondrait à un solide avec un module de compressibilité négatif, ce qui n'était pas admissible.⁵ D'autre part, George G. Stokes (1819-1903) avait montré en 1862 que la rotation locale d'un élément du milieu causait une force élastique dans le sens contraire. Le solide de MacCullagh violait le principe d'action et réaction. Pour ces raisons la théorie fut quelque peu oubliée avant que FitzGerald ne la remette sur le devant de la scène.

Si ses premiers travaux sur réflexion et réfraction comportent quelques déficiences, ils permettent à FitzGerald d'exprimer les conditions aux limites pour des ondes incidentes dans la théorie de Maxwell, et de retrouver ainsi les lois de Fresnel pour la réflexion et la réfraction d'une onde à une interface entre deux milieux (voir plus haut en note). D'autre part, FitzGerald peut donner une explication pour l'effet Faraday (qui est une double réfraction pour des ondes polarisées circulaire-droite et circulaire-gauche), ainsi que pour les observations de Kerr faites en 1876, montrant que la polarisation de la lumière est altérée lors d'une réflexion sur un pôle d'un aimant. En tirant les conclusions de ses études, FitzGerald met d'ailleurs clairement en évidence une incompatibilité entre la théorie de Maxwell et un éther matériel se comportant comme un solide élastique. Il montre enfin que la théorie de Maxwell est, de façon analytique, équivalente à celle de MacCullagh. Ainsi, l'équation du mouvement de MacCullagh (équation 3.1) est identifiable à l'équation de Maxwell-Faraday :

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \wedge \mathbf{E} \quad (3.2)$$

si \mathbf{B} est l'impulsion $\mu \frac{\partial \boldsymbol{\xi}}{\partial t}$ et \mathbf{E} le couple local.

Il rejoint en partie la conclusion de Stokes qui, en 1862, avait avancé que la théorie de MacCullagh ne pouvait pas représenter un solide élastique. Ce qui avait à cette époque discrédité la théorie de MacCullagh devient un argument supplémentaire pour abandonner la vision de l'éther comme solide élastique. FitzGerald est conscient qu'un éther élastique est un point délicat et largement discuté, et que ce point fragilise la théorie de Maxwell. Aussi, il cherche à « s'émanciper » des modèles utilisant ce type d'éther. Il conclut l'un de ses premiers

5. Le coefficient de compressibilité, ou module de compressibilité, exprime la propension d'un corps à changer de volume sous l'effet d'une pression. Pour le coefficient de compressibilité isotherme, la définition est : $\chi_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$. Une définition similaire est donnée au coefficient de compressibilité isentropique. Notons que le signe « - » dans l'expression a justement pour but de manipuler une grandeur positive, puisque les corps voient leur volume diminuer si l'on exerce une pression.

articles à la *Royal Society* ainsi :⁶

Cette étude est à mettre en avant comme une confirmation de la théorie électromagnétique de la lumière du professeur Maxwell, dans laquelle, bien qu'il y ait encore quelques points nécessitant un approfondissement, les bases d'une grande contribution à notre savoir ont certainement été posées, et, si cela nous pousse à nous émanciper de la servitude d'un éther matériel, pourrait mener aux plus importants résultats dans l'explication théorique de la nature.

Hunt souligne de plus que cette vision n'est en aucun cas associée à un retrait de l'éther, mais à un refus d'un éther *matériel*, d'une matière élastique ordinaire.

Le modèle « roues et bandes »

Comme ses acolytes maxwelliens, FitzGerald poursuit l'exploration et la reformulation des équations trouvées par Maxwell, mais également la création de modèles mécaniques. L'objectif est de s'approcher du vrai mécanisme de l'éther tout en reformulant les lois de l'électromagnétisme pour les rendre plus claires et plus explicites. En particulier, l'explication de notions comme le courant électrique — souvent obscure chez Maxwell comme nous l'avons déjà vu — est un élément indispensable à l'expansion des idées de Maxwell. Dans ce but, FitzGerald crée en 1885 un modèle mécanique basique, version simplifiée du modèle de Maxwell : le modèle « roues et bandes » (*wheel-and-band model*).

La construction de ce modèle par FitzGerald a pour origine la découverte de John Henry Poynting (1852-1914) l'année précédente, en 1884, portant sur la direction du flux d'énergie électromagnétique : le flux d'énergie à travers une surface est donné par $\int (\mathbf{E} \wedge \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{S}$. L'énergie se déplace donc selon un vecteur normal aux forces \mathbf{E} et \mathbf{H} . C'est cette idée que FitzGerald souhaite mettre en avant avec son modèle.

L'ancien modèle des vortex de Maxwell ne peut décrire cet aspect. Cependant, FitzGerald en reprend deux caractères importants : la correspondance entre force magnétique et rotation locale, et la tension diélectrique comme résultante de l'élasticité du mécanisme reliant les vortex. Le modèle à deux dimensions est schématisé sur la figure 3.1 : des roues d'axes parallèles sont reliées entre elles par blocs par des bandes de caoutchouc (*indiarubber*), selon deux directions perpendiculaires. La vitesse de rotation de la roue représente la force magnétique. Une différence de vitesse entre deux roues implique une contrainte au niveau de la bande

6. Hunt 1991, p. 22. Cite FitzGerald.

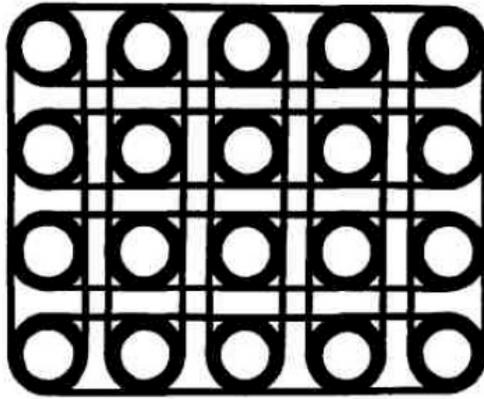


FIGURE 3.1 – Modèle *wheel-and-band* de l'éther électromagnétique de FitzGerald (tiré de Hunt 1991, p. 79).

intermédiaire, donc une tension élastique. Enfin, la friction des bandes sur les roues génère une perte par chaleur, correspondant à l'effet Joule dans un milieu conducteur. Les bandes élastiques jouent le même rôle que les billes chez Maxwell : ce sont elles qui transfèrent le mouvement de rotation d'une roue à l'autre. Par conséquent, si toutes les roues d'une région tournent à la même vitesse, aucune contrainte n'apparaîtra au niveau des bandes. À l'inverse, si deux roues tournent dans des sens opposés, les bandes subiront des différences de contraintes fortes : le milieu sera « polarisé ».

Ce modèle présente l'avantage de pouvoir décrire les phénomènes d'électrostatique, comme la charge et la décharge d'un condensateur (voir figure 3.2) : en enlevant les bandes dans deux régions, celles-ci se comportent comme des conducteurs, les « plaques » du condensateur. De plus, si l'on retire les bandes de la partie centrale entre ces deux régions, on obtient un « canal » entre elles. La double flèche indique une force imposée par un dispositif extérieur (par exemple une batterie), forçant le sens de rotation des roues au centre. Alors les roues des deux extrémités ont des sens de rotation différents, et les bandes extérieures subissent des contraintes, comme « chargées » (les bandes fines sont étirées, et les bandes grisées détendues). Cette situation dure tant que la force impose ce sens de rotation aux roues centrales. Si elle s'arrête, les roues auront tendance à tourner dans l'autre sens pour diminuer la tension des bandes, la « décharge » du conducteur. Le seul moyen d'éviter cette décharge est de rajouter les bandes dans la région centrale, pour que cette dernière devienne non-conductrice. Dans ce cas, le système est bloqué et les contraintes exercées ne permettent pas la rotation des roues. Le vecteur symbolisant l'énergie ($\mathbf{E} \wedge \mathbf{H}$) peut se représenter plus simplement car la force

électrique \mathbf{E} est selon la direction des bandes (chez Maxwell elle était tangente aux cellules, mais la direction variait selon le point considéré).

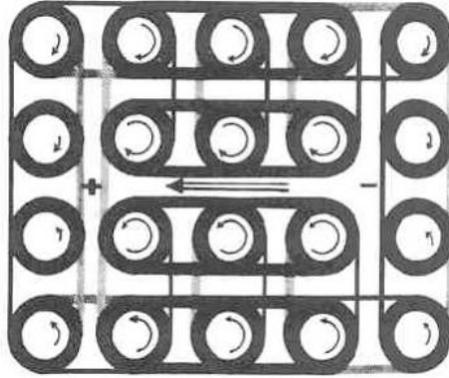


FIGURE 3.2 – Modèle *wheel-and-band* avec contrainte imposée (tiré de Hunt 1991, p. 81).

Des conséquences importantes

FitzGerald utilise ce modèle pour raisonner plus concrètement sur les problèmes posés par l'électrodynamique et la théorie de Maxwell. En particulier, l'un des premiers résultats qu'il tire de son modèle est la compréhension des courants de déplacement. Il ajoute que le terme « déplacement » n'est pas adapté, et que cette notion rentre même en contradiction avec l'idée globale de Maxwell en se rapprochant du solide élastique. Hunt nous dit :⁷

Mais FitzGerald trouva que cette interprétation littérale menait à des contradictions, et il pensa que « c'était bien plus probable que ce que [Maxwell] appelait 'déplacements électriques' fussent des changements dans la structure des éléments de l'éther, et non des déplacements concrets des éléments ».

Cette interprétation des « déplacements » mettra notamment aux prises FitzGerald et Thomson. Dans ses *Baltimore Lectures* de 1885 sur la théorie ondulatoire de la lumière, ce dernier conserve le modèle du solide élastique et compare l'éther à « une gelée ».⁸ Les oscillations de la lumière sont alors vues comme de « vraies » vibrations, des déplacements *de* l'éther. Toutefois, la vision de l'éther comme solide élastique a de plus en plus de mal à se maintenir comme réaliste. L'explication du mouvement des planètes (ou d'autres corps

7. Hunt 1991, p. 84. Cite FitzGerald entre guillemets.

8. « jelly » theory of the ether, Hunt 1991, p. 85.

mobiles) à travers un solide élastique nécessite que celui-ci soit suffisamment « mou », tout en pouvant propager des vibrations transverses rapides des ondes électromagnétiques et de la lumière. D'autre part, l'existence d'aimants permanents et de courants électriques statiques n'est pas évidente dans un « éther - gelée ». Là où Thomson voit un argument pour rejeter la théorie de Maxwell, FitzGerald souhaite mettre un terme aux spéculations sur l'éther comme un solide élastique, et avec elles à l'interprétation littérale de « déplacement ».

3.2 Changements radicaux

Les réticences de Thomson

L'opposition des idées sur la façon de décrire les phénomènes lumineux mène d'ailleurs rapidement à des décisions prises sur la nature même de l'éther. Confronté aux conclusions des Maxwelliens, le modèle de l'éther comme solide élastique, soutenu par Thomson, décline peu à peu. Pour ce dernier, la théorie des vortex de Maxwell ne peut représenter le stade final d'une théorie de l'électromagnétisme et de la lumière. S'il reconnaît volontiers avoir « une immense admiration » pour une telle théorie, il la considère comme « un retour en arrière par rapport à un modèle mécanique absolu » prôné par Fresnel et ses successeurs.⁹ Le traitement par Maxwell des phénomènes dynamiques, en utilisant le formalisme lagrangien, éloigne sa théorie d'un modèle purement mécanique (c'était, nous l'avons vu, le grand intérêt de cette approche, qui permettait de ne pas tenir compte de mécanismes « cachés »). De plus, Thomson et Maxwell étaient en désaccord sur la façon d'obtenir les relations. Maxwell a utilisé les analogies pour mettre en avant les notions centrales de son modèle (courants de déplacement, expression des contraintes, ...). Thomson désapprouve un tel recours aux analogies, démarche qui lui paraît trop hasardeuse.¹⁰

Les mouvements des vortex

L'utilisation des vortex dans les théories des modèles d'éther reste un lieu commun jusqu'à la fin du XIXe siècle. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, le modèle de Maxwell se base initialement sur des vortex, présents dans l'éther (indépendamment de la présence de matière ordinaire), des *molecular vortices* qu'il avait repris des explications de Thomson

9. Darrigol 2000 (b), p. 177. Cite Thomson.

10. Darrigol 2000 (b), p. 178.

sur l'effet Faraday. Mais Maxwell n'est pas le seul à utiliser ces objets : les premiers essais de théorie basée sur les vortex, notamment de Helmholtz puis Thomson, ont plutôt pour objectif d'expliquer les propriétés de la matière pondérable. Selon l'hypothèse des « vortex-atomes » de Thomson, les atomes de la matière sont constitués de vortex d'un fluide parfait, et interagissent entre eux de la même façon que le font deux anneaux de fumée lorsqu'ils se rapprochent.¹¹

Toutefois, si cette théorie des « vortex-atomes » est assez vite reconnue, les hypothèses utilisées posent certaines interrogations. D'une part, il est difficile d'expliquer la différence de densité entre matière ordinaire et éther, si les deux sont composés des mêmes vortex. D'autre part, si l'énergie (cinétique) d'un vortex augmente, son inertie également doit augmenter.¹² Or l'inertie d'un solide semble indépendante de la température. Ces différents éléments amènent finalement Thomson à penser que le système est instable. Il lui faut donc trouver une autre voie pour appliquer la théorie des vortex à la construction de modèles d'éther. En 1880, il montre qu'une quantité de fluide contenant des filaments de vortex orientés de façon aléatoires peut acquérir une rigidité effective, et donc permettre la propagation d'ondes transverses. À ce fluide il donne le nom de « vortex-éponge ».¹³

Le modèle du vortex-éponge

Thomson pense pouvoir expliquer la rigidité des solides et de l'éther en utilisant l'inertie des vortex constituant la matière. Il a également vu ce système comme une solution possible au problème de l'éther. FitzGerald reprend les suppositions de Thomson pour les élever au rang de théorie, voire de credo :¹⁴

11. Darrigol 2000 (b), p. 147 ; Whittaker 1910, p. 325.

12. L'énergie cinétique d'un vortex dans un fluide parfait est proportionnelle à $R \ln \left(\frac{R}{\xi} \right)$, où R est le rayon total du vortex et ξ est le rayon du cœur du vortex. Une augmentation du rayon entraîne donc une augmentation de l'énergie cinétique. L'inertie (moment d'inertie) d'un vortex, est proportionnelle à R^2 , donc augmente également. Voir Guyon 2012, p. 283-90.

13. Traduction de *vortex-sponge*. Voir Thomson 1889 et Whittaker 1910, p. 326-7. Thomson a introduit le terme dès les années 1860, mais c'est FitzGerald qui l'applique le premier à l'éther (Hunt 1991, p. 97 notes).

14. Darrigol 2005 (b), p. 242. Cite FitzGerald.

Il semble certain que le seul moyen pour un fluide parfait de devenir en tout point pourvu de propriétés analogues à la rigidité est d'être en tout point en mouvement. L'hypothèse la plus générale de ce genre serait ce que Sir William Thomson a appelé le vortex-éponge, i.e. en tout point pourvu d'un mouvement de vortex, mais de telle façon que, quelque soit l'élément de volume considéré, il y ait égales quantités de vortex dans toutes directions. En de nombreux points cette supposition semble s'accorder avec ce que nous savons des propriétés de l'éther.

L'enthousiasme pour le modèle de vortex-éponge croît assez rapidement, en partie grâce aux nombreuses possibilités que présentent ce modèle. En 1887, dans un article intitulé « On the Vortex Theory of the Luminiferous Aether », Thomson fournit la preuve mathématique qu'un vortex-éponge peut transporter des ondes transverses comme celle de la lumière. En 1889, dans un article envoyé au journal *Nature*, FitzGerald annonce que les tourbillons et les flux des vortex se comportent comme les vecteurs magnétiques et électriques de la théorie de Maxwell.¹⁵ Toutefois cette ardeur est vite tempérée, car l'article et la démonstration ayant été rédigés trop rapidement, des erreurs sont trouvées. Thomson montre en septembre 1889 que le vortex-éponge n'est pas un système stable, et que seuls les vortex avec des régions centrales vides peuvent persister. FitzGerald continuera néanmoins de croire en ce modèle jusqu'à la fin du siècle.¹⁶

Si le modèle présenté par FitzGerald est incorrect pour décrire la propagation de la lumière, il n'en reste pas moins un bel exemple du programme mécaniste de la physique victorienne. La mécanique des vortex est, à la fin du XIXe siècle, un des sujets les plus traités en physique mathématique. La théorie des vortex représente en effet la forme la plus pure d'un système mécaniste : seuls la matière et le mouvement y sont autorisés. Aucun recours à une action à distance, à de l'élasticité ou une quelconque énergie potentielle n'est nécessaire.

3.3 L'usine de Lodge

Oliver Lodge est, avec FitzGerald, le grand promoteur des idées de Maxwell. Ils sont les premiers, entre 1879 et 1883, à étendre la théorie de Maxwell aux ondes électromagnétiques de longueur d'onde plus grande que celles de la lumière, et à s'intéresser aux moyens de

15. L'article en question est « On an electromagnetic interpretation of turbulent liquid motion », *Nature*, 1889. Voir Darrigol 2000 (b), p. 454.

16. Hunt 1991, p. 96-103.

produire de telles ondes. Un de leurs rôles fondamentaux est d'expliquer clairement et simplement les concepts présents chez Maxwell, qui sont, pour la majeure partie des physiciens, parfois difficiles à comprendre. Lodge est le premier à essayer de remplir cette tâche.

Le modèle corde et boutons

Lors de ses premiers efforts pour comprendre le *Treatise* de Maxwell, en 1876, Lodge imagine et construit le modèle mécanique « cordes et boutons » (représenté sur la figure 3.3).

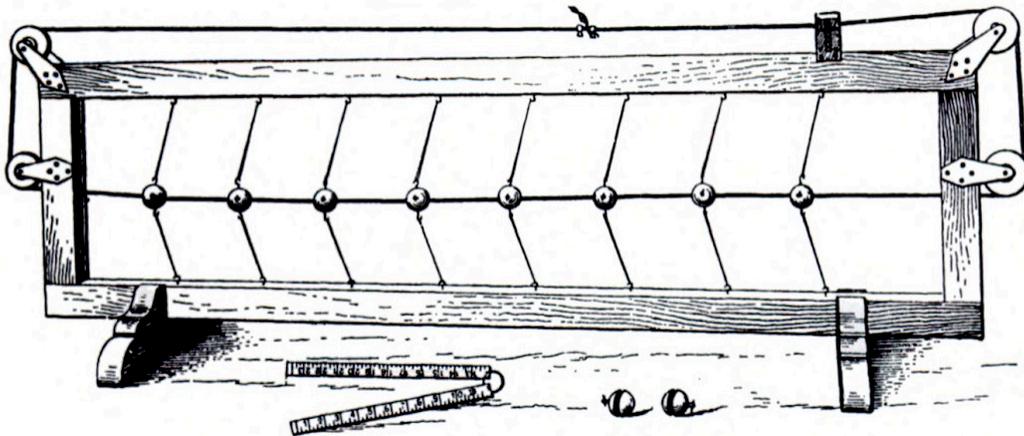


FIGURE 3.3 – Modèle *cord and beads* de Lodge pour un circuit électrique (tiré de Hunt 1991, p. 89).

Dans ce dispositif, une corde fermée passe à travers une série de boutons, reliés au cadre extérieur par des bandes de caoutchouc. Lorsque les boutons sont attachés fixement à la corde, l'élasticité résiste à un déplacement : le système représente un diélectrique. À l'inverse, lorsque les boutons ne sont pas fixés, la corde peut passer librement à travers eux en créant de la friction, le système modélise alors un conducteur. Hunt ajoute que les propriétés du système mécanique peuvent être directement reliées aux propriétés électriques : le coefficient de friction des boutons correspond à la résistivité électrique, l'élasticité des bandes à la capacité du diélectrique, etc.¹⁷

17. Hunt 1991, p. 89.

Des objectifs similaires

FitzGerald et Lodge sont très proches et échangent régulièrement sur leurs différents projets. Expérimentateur émérite, Lodge se repose sur FitzGerald pour le coté théorique. Comme il l'avoue à son ami en 1880, il est « gravement ignorant de la théorie ondulatoire ordinaire actuellement ».¹⁸ Tous deux ont néanmoins des idées différentes sur la nature de ces ondes. Pour Lodge, l'éther est composé de deux électricités, positive et négative, telles qu'elles puissent être séparées lors du passage d'une force électromotrice. C'est lui le premier qui imagine, dès 1879, des moyens de générer de la lumière en utilisant des dispositifs électriques, en particulier la décharge d'un condensateur. FitzGerald est plus réservé quant à cette possibilité, notamment à cause d'une mauvaise interprétation des implications de la théorie de Maxwell. Pour lui, la lumière est une conséquence de l'interaction entre matière et éther, alors que les ondes électromagnétiques sont d'un autre type :¹⁹

La création de telles perturbations [comme la lumière] n'est pas un phénomène de courants électriques tels que ceux dont nous traitons, mais est liée aux relations entre matière et éther. [...] L'interaction entre matière et éther qui crée la lumière n'est pas la même que celle entre les courants électriques et l'éther.

Ce choix pousse à une différenciation, même légère, des phénomènes optiques et électromagnétiques. Lodge essaie de concilier sa vision et celle de FitzGerald en arguant qu'il est impossible de créer une vibration matérielle de l'éther (*bodily motion*), et que « si la lumière est une vibration matérielle de l'éther, alors il est impossible de la générer électriquement ».²⁰ Cette hypothèse lui permet de conserver son idée que les deux électricités qui composent l'éther peuvent être séparées, mais que le tout ne peut pas subir de déplacement. C'est cette vision qu'il utilise dans son modèle suivant.

Le modèle des engrenages

Le modèle le plus connu créé par Lodge est le modèle des engrenages, ou *cogwheels* (voir figure 3.4). Contrairement au modèle précédent, il n'a pas pour but de représenter un phénomène électrique en utilisant une analogie mécanique, mais bien de représenter l'éther lui-même. Lodge s'inspire directement du modèle de Maxwell et de celui de FitzGerald, préférant

18. Hunt 1991, p. 37. Cite Lodge.

19. Hunt 1991, p. 35.

20. Hunt 1991, p. 36. Cite Lodge, les italiques sont de Lodge.

toutefois lier les roues directement entre elles en utilisant des engrenages. Ce choix pose le problème déjà évoqué pour Maxwell du sens de rotation de deux roues consécutives. Reprenant son idée de deux « électricités », l'une négative, l'autre positive, il définit deux types de roues de signes opposés. Une rangée comporte exclusivement des roues de même signe, et les deux types alternent. Sur la figure 3.4, le rail central représente le courant électrique et les roues en rotation le champ magnétique. Un milieu conducteur est représenté par des roues lisses et non dentées (voir figure 3.5). Les roues en rotation génèrent de la friction.



FIGURE 3.4 – Modèle des engrenages de l'éther de Lodge (tiré de Hunt 1991, p. 91).

Une démarche critiquée

Comme nous l'avons déjà dit, l'utilisation de modèles est largement répandue parmi les physiciens britanniques, avec certains avis plus réservés que d'autres— comme celui de Thomson — sur l'utilisation que l'on peut en faire. Cependant, Lodge sera vivement critiqué pour son utilisation abusive des modèles. D'une part, en multipliant les modèles Lodge peine à construire un ensemble cohérent et à convaincre. C'est ce que lui rapporte FitzGerald en 1893 à propos de certains de ses collègues :²¹

[Ils] ont objectés qu'ils étaient embrouillés par tes sauts d'une théorie à une autre, ou plutôt d'une analogie à une autre au lieu de présenter un système continu qui serait cohérent tout du long.

21. Hunt 1991, p. 92. Cite FitzGerald.

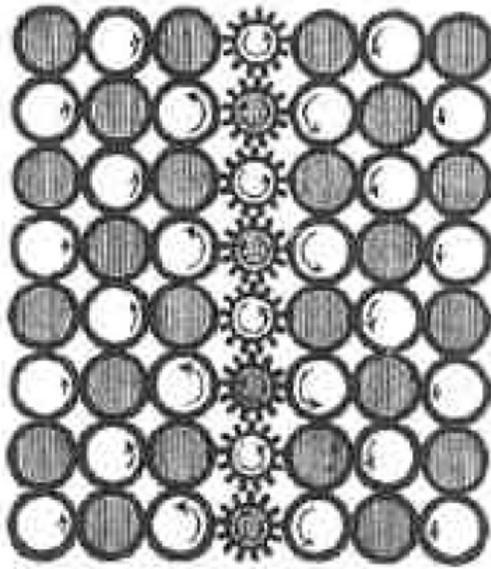


FIGURE 3.5 – Modèle des engrenages de l'éther pour deux milieux conducteurs séparés par un milieu isolant (tiré de Hunt 1991, p. 92).

D'autre part, même en construisant des modèles matériels, Lodge peut s'écarter d'une visée purement mécaniste, et tomber dans la supposition physique. C'est le cas lorsque, dans son modèle des engrenages, il fait intervenir deux types de roues, introduisant un dualisme fondamental qui n'est pas réductible à une différence purement mécanique. Les physiciens britanniques ne sont d'ailleurs pas les seuls à être gênés par la propension de Lodge à utiliser des modèles qui tiennent plus du système industriel que du modèle basique (cordes et boutons, engrenages...). C'est notamment lui que Pierre Duhem critique lorsqu'il s'attaque aux physiciens britanniques. Ainsi, dans son ouvrage *La Théorie Physique*, en parlant du livre de Lodge, Duhem porte un jugement sévère sur l'ouvrage :²²

Voici un livre destiné à exposer les théories modernes de l'électricité, à exposer une théorie nouvelle ; il n'y est question que de cordes qui se meuvent sur des poulies, qui s'enroulent sur des tambours, qui traversent des perles, qui portent des poids ; de tubes qui pompent de l'eau, d'autres qui s'enflent et se contractent ; de roues dentées qui engrènent les unes sur les autres, qui entraînent des crémaillères ; nous pensions entrer dans la demeure paisible et soigneusement ordonnée de la raison déductive ; nous nous trouvons dans une usine.

22. Duhem 1914, chap. IV, §V.

Les successeurs de Maxwell, FitzGerald et Lodge en tête, se sont efforcés d'expliquer les idées de Maxwell en approfondissant les concepts clés de sa théorie, comme la notion de courant et les « courants de déplacement », tout en explorant d'autres voies comme la génération des ondes électromagnétiques par des systèmes électriques, point que Maxwell n'avait pas abordé. D'un point de vue théorique toutefois, les « équations de Maxwell » telles qu'on les connaît aujourd'hui sont principalement l'œuvre d'un troisième physicien britannique ayant suivi les traces de Maxwell : Heaviside.

3.4 Heaviside : de la télégraphie aux équations

Oliver Heaviside (1850-1925) est sûrement l'un des protagonistes les plus fascinants de tout le paysage de la physique britannique du XIXe siècle, tant par sa personnalité que par ce qu'il a apporté aux théories qu'il a étudiées. De par sa formation d'ingénieur, il joue également un rôle central dans la diffusion de la théorie de Maxwell dans le domaine des applications, notamment en publiant dans des journaux dédiés à l'électricité.

Un personnage hors du commun

Le parcours atypique de Heaviside pendant sa jeunesse, bien différent de celui de ses confrères Lodge ou FitzGerald, a eu des répercussions sur son attitude pour aborder les problèmes qu'il traite, ainsi que sur ses capacités à communiquer avec les autres. Oliver Heaviside est né en 1850 à Londres, dans une famille peu aisée. Quatrième fils de la fratrie, il mène une enfance qu'il qualifie lui-même de « dickensienne ». ²³ Après avoir hérité, la famille Heaviside a pu emménager dans un quartier plus aisé de Londres, où Oliver suit des cours à l'école pendant quelques temps, avant que ses parents ne se retrouvent de nouveau avec des moyens limités. Si son enseignement scientifique scolaire est tout de même honorable, c'est surtout en tant qu'autodidacte qu'Oliver développe son goût pour la physique. Dans l'une de ses métaphores autobiographiques, il explique : ²⁴

23. « I used to live with Dickens, with his characters, that is to say », Heaviside (Hunt 1991, p. 51).

24. Hunt 1991, p. 51. Cite Heaviside. Son oncle, Charles Wheastone, a peut-être joué un rôle dans l'apprentissage du jeune Oliver en lui donnant accès à des ouvrages scientifiques.

Il y a plus d'un tiers de siècle, dans la bibliothèque d'une ancienne ville, un jeune a pu tester les douceurs du savoir pour voir à quel point il les aimait... Dans la maison de son père il n'y avait pas beaucoup de livres, c'était ainsi comme un voyage au cœur de terres étrangères d'aller goûter à d'autres livres. Certains livres étaient empoisonnés, en particulier la théologie et la métaphysique, ils étaient refermés avec fracas. Mais les travaux scientifiques étaient bien mieux, on trouvait quelque sens à chercher les lois de Dieu par l'observation et l'expérience, ainsi que par les raisonnements qui se fondaient dessus. Certains énormes ouvrages portant des noms prodigieux, tels Newton, Laplace, etc. attirèrent son attention. Après réflexion, il conclut qu'il pourrait les comprendre s'il essayait.

Outre les ouvrages canoniques de la physique, Heaviside étudie aussi des livres mathématiques, notamment les « Quaternions » de Hamilton. Et Hunt d'ajouter :²⁵

Mais il est clair qu'à seize ou dix-sept ans, Heaviside avait, essentiellement par une étude personnelle, posé les fondations d'une extraordinaire éducation scientifique.

Ses débuts comme télégraphiste

Sans ressources financières pour poursuivre des études à l'université, Heaviside commence à travailler en tant que télégraphiste. Ce choix n'est pas totalement le fruit du hasard, l'un de ses oncles par alliance étant Sir Charles Wheatstone, inventeur du télégraphe. Oliver Heaviside est ainsi envoyé à Newcastle pour travailler sur le câble sous-marin anglo-danois, d'abord en tant qu'opérateur, puis en tant qu'« électricien », i.e. comme expert en théorie électrique. En plus de son emploi pour la compagnie du télégraphe, Heaviside continue d'étoffer son éducation en physique, en consultant les ouvrages les plus récents. Le premier article qu'il publie date de juillet 1872, dans le *English Mechanic*.²⁶

En février 1873, il fait ses débuts dans le *Philosophical Magazine*, alors le journal majeur en physique. Dans cet article, « On the Best Arrangement of Wheatstone's Bridge for Measuring a Given Resistance with a Given Galvanometer and Battery »,²⁷ il affiche une maîtrise mathématique qui attire sur lui l'attention de physiciens reconnus parmi lesquels Maxwell et Thomson. Ce dernier aidera notamment Heaviside à publier ses articles suivants. Si les capacités mathématiques de Heaviside sont indiscutables, il n'en est pas de même de sa faculté

25. Hunt 1991, p. 52.

26. L'article en question s'intitule « Comparing electromotive forces », publié dans le *English Mechanic* en juillet 1872. Voir Heaviside 1892, vol. 1, p. 1.

27. Heaviside 1892, vol. 1, pp. 3-7.

à discuter avec les autres chercheurs et ses collègues. Atteint d'une surdité partielle pendant l'enfance suite à une scarlatine, et bien qu'il ait récupéré une audition presque complète, Heaviside reste solitaire et suspicieux envers les autres, comme « s'[ils] parlaient dans son dos ». ²⁸ D'autre part, une certaine confiance en lui et en ses capacités ont rapidement pour effet d'irriter certains de ses collaborateurs. Dans un article « On Duplex Telegraphy », ²⁹ paru en juin 1873, Heaviside fait pour la première fois montre d'un sarcasme et d'un mépris pour une autorité qui lui attirent de nombreuses critiques. Cette attitude vis-à-vis de physiciens ou de responsables de la compagnie du télégraphe, ainsi qu'un refus de se considérer lui-même comme physicien, sont très probablement les principales raisons de l'absence de Heaviside au sein des institutions scientifiques de l'époque.

Un télégraphiste avant tout

Heaviside démissionne de son poste d'ingénieur du télégraphe en 1874,   la fois pour des raisons de santé mais également parce qu'il estime que ses conditions de travail ne lui laissent que trop peu de temps pour ses recherches. Pendant les années qui suivent, son principal objet de recherche est la propagation dans les câbles télégraphiques, en particulier la distorsion des signaux, à l'époque un enjeu majeur pour l'évolution des communications sous-marines. Heaviside reprend les calculs de Thomson sur la propagation de signaux et les applique dans un premier temps à des cas particuliers. Son premier article d'importance ne concerne pas un cas d'application mais une extension de la théorie. Dans son article « On the Extra Current », ³⁰ daté d'août 1876, Heaviside modifie les équations de Thomson en prenant en compte le phénomène d'induction propre. L'équation de propagation qu'il en déduit, connue sous le nom « d'équation du télégraphe » ou «  quation de Heaviside », est : ³¹

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \Gamma r \frac{\partial u}{\partial t} + \Lambda \Gamma \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.3)$$

où u est la tension considérée au point x , Γ est la capacité, r la résistance et Λ l'inductance du câble, tous par unité de longueur.

Heaviside corrige de cette façon l'équation trouvée par Thomson, qui avait négligé l'inductance propre du câble. Outre le fait d'ajouter un terme, cette correction est fondamentale

28. Hunt 1991, p. 53.

29. Heaviside 1892, vol. 1, pp. 18-33.

30. Article publié dans le *Philosophical Magazine*. Voir Heaviside 1892, vol. 1, pp. 53-60.

31. Cette équation de propagation avait déjà été formulée par Kirchoff en 1857, mais pas dans un contexte télégraphique.

car la dérivée partielle seconde par rapport au temps transforme ce qui était au départ une équation de diffusion en une équation d'onde avec des oscillations, qui tendent vers un état d'équilibre (avec l'établissement d'ondes stationnaires). Ainsi, Heaviside reprend la théorie de Maxwell en affirmant que le changement d'état d'équilibre pour un système électromagnétique se fait au moyen d'oscillations, ce que Hunt appelle « le début de la reconceptualisation de la propagation télégraphique en termes d'ondes électromagnétiques par Heaviside ». ³²

Dans ses premiers travaux, Heaviside utilise principalement les paramètres « pratiques » de l'électricité, comme la résistance et la capacité d'une ligne. Afin de poursuivre ses recherches plus avant dans la théorie il s'oriente, à partir des années 1880, vers le côté fondamental de l'électromagnétisme et utilise des notions comme le champ et les forces associées. Cependant, Heaviside conservera toujours l'objectif de pouvoir appliquer ses découvertes à la pratique, en particulier à la télégraphie. Selon Hunt : ³³

Mais alors que ses méthodes changeaient, le but d'Heaviside restait le même : il continuait, maintenant à travers l'étude de la théorie électromagnétique fondamentale, de chercher des outils qu'il pouvait utiliser pour aider à l'amélioration de la télégraphie.

Un maxwellien convaincu

À partir de 1882, Heaviside se décrit lui-même comme un adepte de la théorie de Maxwell. La très grande majorité des articles qu'il publie par la suite ont trait à l'élaboration (ou l'application) de la théorie de Maxwell. Dans le même temps, il commence à publier dans un journal spécialisé pour les ingénieurs, *The Electrician*. Il y paraît ainsi des séries d'articles de Heaviside, presque continuellement jusqu'à 1902. La majeure partie de ces articles a été reprise dans les *Electrical Papers*. Outre les idées, Heaviside reprend également dans ses articles les méthodes de Maxwell, en illustrant les équations qu'il fournit par des analogies. Ainsi, dans un article de 1891 publié dans le journal anglais spécialisé *The Electrician*, Heaviside cherche à établir les équations couplées sur les forces \mathbf{E} et \mathbf{H} , et à étudier les conséquences de ces équations pour la télégraphie. Il rappelle brièvement les grandes lignes de la théorie de Maxwell, en particulier l'analogie habituelle selon laquelle « la force magnétique \mathbf{H} correspond à la vitesse du milieu, l'induction \mathbf{B} à sa quantité de mouvement etc. ». Pour illustrer ses idées sur le mouvement de l'éther, il prend l'analogie de trois tubes concentriques, qui lui

32. Hunt 1991, p. 67.

33. Hunt 1991 p. 68.

permet de préciser le rôle du conducteur, des diélectriques, ou encore de la tension électrique appliquée au câble.³⁴

De manière générale, Heaviside place la dynamique au centre de son raisonnement : « 'Toutes les sciences physiques', dit-il, 'sont vouées à devenir des branches de la dynamique au fil du temps, et tout ce qui contredit les principes de dynamique devrait être rejeté sans hésitation' ». ³⁵ Refusant toute spéculation sur la nature de l'électricité, il cherche à exprimer les résultats de Maxwell sous une forme simple — autant que faire se peut — et compréhensible, notamment pour le monde des ingénieurs. Il travaille à donner un sens géométrique aux opérateurs « gradient », « divergence » et « rotationnel », et exprime les équations trouvées par Maxwell avec ces opérateurs, sous une forme vectorielle. Indépendamment de Poynting, Heaviside arrive à l'expression du flux d'énergie en fonction du vecteur $\mathbf{E} \wedge \mathbf{H}$. Enfin, il conserve la distinction que Maxwell fait entre les forces \mathbf{E} et \mathbf{H} et les flux associés \mathbf{D} et \mathbf{B} .

Concernant les équations couplées du champ, Heaviside souhaite établir une symétrie entre les deux relations. Considérant l'équation $\nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{J}$, où \mathbf{J} est le courant électrique total $\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$, il introduit un « courant magnétique total » $\mathbf{G} = g\mathbf{H} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$, avec le terme de dérivée de \mathbf{B} qui est introduit en arguant de cette symétrie, et g une constante de « conductivité magnétique » introduite pour renforcer cette symétrie. Le système résultant :

$$\begin{aligned} \nabla \wedge \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \nabla \wedge \mathbf{E} &= \mathbf{G} \end{aligned} \tag{3.4}$$

est ainsi parfaitement symétrique, et regroupe les équations de Maxwell en n'utilisant que les forces et les flux. En particulier, il met sur la touche les potentiels (scalaire et vectoriel), ce qui constitue une grande fierté pour lui, refusant leur utilisation dans le formalisme lagrangien. Enfin, concernant l'électromagnétisme des corps en mouvement, il s'intéresse aux contributions supplémentaires qui apparaissent : $\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$ pour la force électrique, conséquence de la loi de Faraday appliquée aux corps en mouvement (terme qu'on retrouvera dans l'expression de la force de Lorentz), et de façon similaire $\mathbf{D} \wedge \mathbf{v}$ pour la force magnétique. Pour respecter le principe d'action et réaction, Heaviside introduit également une « force magnétoélectrique » $\mathbf{D} \wedge \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ découlant du terme qu'il a ajouté au courant magnétique.³⁶

34. Heaviside 1891.

35. Darrigol 2000 (b), p. 196. Cite Heaviside dans les passages entre apostrophes.

36. Darrigol 2000 (b), p. 199.

Sa conviction de vouloir appliquer les théories qu'il étudie à la pratique, sa position d'ingénieur du télégraphe et ses nombreuses publications dans des revues spécialisées font de Heaviside un maillon indispensable dans la transmission de la théorie de Maxwell vers le monde des ingénieurs. Bien qu'il n'ait pas créé de modèle général, on reconnaît une volonté d'illustrer chacun de ses raisonnements par des comparaisons avec des systèmes mécaniques. Soulignons que ces comparaisons conservent chez Heaviside le rôle d'analogie, sans pouvoir être vus comme de possibles modèles. L'importance accordée aux forces électrique et magnétique diminue de fait le rôle mécanique de l'éther, comme milieu soumis à des contraintes. Le milieu intermédiaire, chez Heaviside, représente avant tout le siège de ces forces électrique et magnétique. Ces caractéristiques se retrouveront chez le scientifique allemand Heinrich Hertz.

Conclusion

La théorie de Maxwell se développe dans les années 1880 grâce au travail de certains physiciens, principalement FitzGerald, Lodge et Heaviside, auxquels il est possible d'associer John Poynting, bien que celui-ci soit plus en retrait par rapport au mouvement mécaniste. Reprenant les idées de Maxwell afin de mettre en avant sa vision des phénomènes électromagnétiques, ils accordent la prédominance au milieu de propagation et cherchent à le modéliser, autant dans un but de recherche que de pédagogie. Ce sont eux qui mettent en place les preuves suffisantes pour dépasser les autres théories de l'éther, en particulier celle du solide élastique soutenue par William Thomson. La théorie de Maxwell est confirmée de manière éclatante par les expériences de Hertz de 1888, avec la détection des ondes électromagnétiques produites électriquement.

Chapitre 4

Une fois éliminées toutes les
impossibilités, l'hypothèse
restante, aussi improbable
qu'elle soit, doit être la bonne.

Arthur C. Doyle

Vers un éther conceptuel

La fin du XIXe siècle est marquée par les expériences sur les ondes électromagnétiques de Hertz (1887-88), qui constituent une preuve irréfutable en faveur de la théorie de Maxwell. Le colloque de Bath, qui se tient en septembre 1888, se déroule peu après la publication des résultats de ces expériences. Il offre une tribune aux maxwelliens pour confirmer la théorie qu'ils ont mise en place. En outre, Hertz construit sa propre théorie de l'éther, qui laisse de côté l'éther mécanique pour une description au moyen du système d'équation. Celle-ci, ainsi que les théories de Lorentz puis de Larmor, ôtent peu à peu à l'éther ses propriétés de milieu mécanique pour lui donner un rôle plus conceptuel, et laissent entrevoir le passage à une théorie de l'électron moderne.

4.1 Le triomphe de Maxwell

Les expériences de Hertz

En 1879, Heinrich Hertz (1857-1894) étudie à Berlin avec Hermann von Helmholtz. C'est sous sa direction que Hertz entame le chemin vers la détection des ondes électromagnétiques. C'est également de son mentor qu'il tire ses connaissances sur la théorie de Maxwell, comme nous le précise Hunt :¹

1. Hunt 1991, p. 154.

Comme la plupart des physiciens continentaux, Hertz fut initié à la théorie de Maxwell à travers le système généralisé de l'électrodynamique que Hemholtz avait construit en 1870, dans lequel chacune des théories électriques en compétition était traitée comme un cas spécial correspondant à une valeur particulière du paramètre « k » : la théorie de Wilhem Weber pour $k = -1$, celle de Franz Neumann pour $k = 1$, et celle de Maxwell pour $k = 0$.

Donnons ici les grandes lignes de la théorie de Helmholtz : les travaux du savant allemand sont empreints d'une philosophie assez prononcée. En laissant de côté ces conceptions, on peut résumer son raisonnement ainsi : dans la nature, les actions sont dues à des forces élémentaires qui sont des forces centrales (dépendant uniquement de la distance entre deux corps) et qui dérivent d'un potentiel. De plus, Helmholtz utilise largement le principe de la conservation de l'énergie. Ses travaux sur l'électrodynamique des courants l'amènent à appliquer à des courants non fermés la « loi des potentiels », à savoir qu'« il existe un potentiel donnant les forces mécaniques par dérivation spatiale et les forces électromotrices par dérivation temporelle », loi déjà utilisée par Franz Neumann, mais uniquement dans le cas des courants fermés. Si le saut est audacieux, Helmholtz n'hésite pas à utiliser les arguments de Thomson et Maxwell selon lesquels un système de courants — fermés ou non — possède une énergie cinétique.²

Helmholtz formule ses potentiels dans le cas le plus général. Il détermine deux potentiels, chacun en lien avec ce qu'il considère comme une action fondamentale : électrostatique et électrodynamique. Il montre que pour des courants, le potentiel électrodynamique général est (en unités SI) :³

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\mathbf{r}' + \frac{1-k}{2} \nabla \xi$$

avec :

$$\xi = -\frac{\mu_0}{4\pi} \int \nabla \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}') |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| d\mathbf{r}'$$

terme qui s'annule dans le cas de courants fermés ($\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$).

Le potentiel électrostatique est tiré de l'équation de Poisson $\Delta\phi + 4\pi\epsilon_0\rho = 0$ et vaut :

2. Darrigol 2000 (b), p. 215-6 sur les conceptions de Helmholtz, et p. 223-5 sur la loi des potentiels. La philosophie de Helmholtz se place dans la droite ligne de la *Naturphilosophie* allemande.

3. *Ibid.*. Voir également *Ibid.*, p. 412. La notation $d\mathbf{r}'$ correspond à une intégration sur toutes les valeurs possibles des \mathbf{r}' .

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(r')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\mathbf{r}'$$

La constante k est un paramètre général, et en fonction de sa valeur on retrouve les résultats des différentes théories énoncées plus haut. Notons cependant un point important : le jugement de Hunt apparaît quelque peu schématique lorsqu'il dit que « chacune des théories électriques en compétition était traitée comme un cas spécial correspondant à une valeur particulière du paramètre k ». En attribuant à k la valeur 0, on retrouve bien les *résultats* de Maxwell, mais les *raisonnements* par lesquels Helmholtz arrive à ces résultats sont bien différents de ceux de l'Écossais. On peut éventuellement considérer la théorie de Helmholtz comme une « méta-théorie » permettant de retrouver tels ou tels résultats, mais il ne faut pas perdre de vue que les concepts utilisés par Helmholtz sont bien différents de ceux de Maxwell.⁴

Si, en Grande-Bretagne, la distinction entre ces différentes théories n'est pas un sujet important (les théories d'action à distance de Weber et Neumann étant déjà considérées comme obsolètes), elle l'est en Allemagne. Bien que ces théories présentent de nombreuses similitudes au niveau des observables, celle de Maxwell prédit en particulier que les courants de déplacement — liés à la polarisation — dans les diélectriques doivent donner des effets électromagnétiques, et que ce phénomène peut être excité par des forces électromotrices. Cette implication est le point de départ des travaux de Hertz, en 1879. Cette année là, l'Académie de Berlin crée un prix sur la question de la polarisation dans les diélectriques. Le choix de ce sujet est simple : l'action des courants de déplacement est une caractéristique essentielle de la théorie de Maxwell. L'énoncé du prix résume parfaitement la vision de cette théorie sur le continent :⁵

La théorie électrodynamique qui a été créée par Faraday et développée mathématiquement par M. Cl. Maxwell présuppose que la formation et la disparition de la polarisation diélectrique dans les milieux isolants — aussi bien que dans le vide — est un processus qui a les mêmes effets électrodynamiques qu'un courant électrique et que ce processus, tout comme un courant, peut être excité par des forces électrodynamiques induites. Selon cette théorie, l'intensité du dit courant devrait être égale à l'intensité du courant qui charge les surfaces du conducteur.

4. Sur la déduction des résultats de Maxwell à partir de la formule de Helmholtz voir : *Ibid.*, p. 225 et p. 413. Darrigol souligne que Helmholtz a été l'un des premiers à discuter les travaux de Maxwell, avant même les physiciens britanniques.

5. Darrigol 2000 (b), p. 234.

L'Académie demande qu'une preuve décisive soit fournie :

1. pour ou contre l'existence d'effets électrodynamique de formation ou de disparition de la polarisation diélectrique avec l'intensité supposée par Maxwell.
2. pour ou contre l'excitation de la polarisation diélectrique dans les milieux isolants par des forces électromotrices induites par des moyens magnétiques ou électrodynamiques.

Nous ne développerons pas ici le raisonnement que Hertz a adopté durant la décennie qui lui a été nécessaire à prouver ces deux phénomènes, et nous laissons le lecteur se référer à une bibliographie plus poussée pour les détails de cette période, parfois riche en surprises.⁶ Nous mentionnerons simplement le grand talent de Hertz, que ce soit dans l'approche expérimentale ou dans l'analyse théorique des phénomènes observés.

Le dispositif utilisé par Hertz pour ses expériences de 1887 et 1888 sur la propagation des ondes est constitué d'un circuit primaire générant l'étincelle, et d'un circuit secondaire récepteur. La perturbation est créée par la décharge de deux sphères conductrices à travers un fil comportant un espace (*gap*). Les sphères sont portées à une tension élevée par une bobine de Ruhmkorff jusqu'à ce qu'une étincelle se produise dans le gap. Cette étincelle étant conductrice, les sphères se déchargent alors. Cette décharge est oscillatoire car les deux sphères ont une capacité et le fil qui les joint a une inductance. Le détecteur, que l'on désignera sous le nom de « circuit secondaire », est une boucle, ouverte à un endroit avec un gap d'une certaine largeur. Lors de l'expérience, la perturbation produit une étincelle secondaire dans le gap de ce circuit, qui se comporte comme un oscillateur avec une excitation forcée. Les caractéristiques de ce circuit sont optimisées pour utiliser au mieux le phénomène de résonance.⁷

En novembre 1887, Hertz cherche à montrer que l'induction électromagnétique se propage (et a donc une vitesse finie). Pour cela il utilise le dispositif repris sur la figure 4.1. Les plaques A et A' forment l'oscillateur dans lequel la décharge primaire se produit. Le câble part de la plaque P, parallèle à A, et se courbe en *m* et *n* pour être selon un axe *rs*, dans le plan médian du gap de l'oscillateur. Les circuits secondaires sont situés selon cet axe *rs*. Le passage de l'impulsion dans le câble crée, par induction, une étincelle secondaire. Hertz étudie des ondes progressives et des ondes stationnaires, ce qui lui fait observer une variation périodique de l'étincelle selon l'axe horizontal, et qui permet de repérer les nœuds

6. Pour les travaux de Hertz sur la période 1879-1886 : voir Darrigol 2000, p. 234-51 et Buchwald 1994.

7. Les deux circuits, primaire et secondaire, constituent ce que l'on nomme des « circuits RLC » (résistance, inductance, bobine).

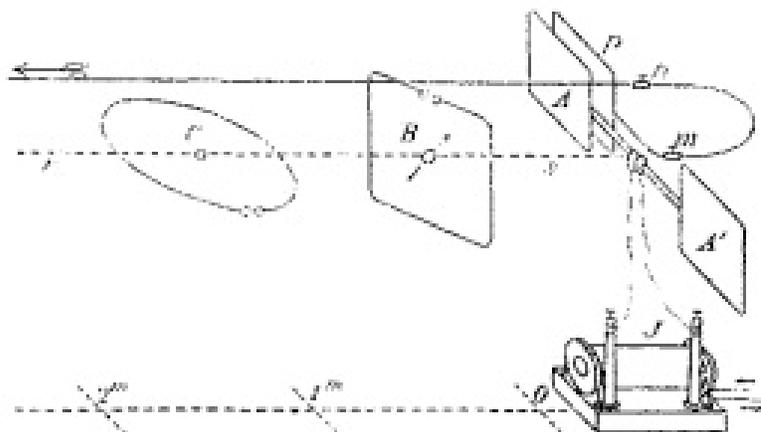


FIGURE 4.1 – Dispositif expérimental de Hertz pour montrer la propagation des ondes dans un câble (tiré de Darrigol 2000 p. 249)

de l'onde. Cette périodicité donne directement la longueur d'onde de l'onde, ainsi que sa vitesse (en utilisant une période estimée pour l'oscillateur). Dans un second temps, Hertz met en place un système interférentiel pour comparer la phase de l'onde dans le câble et celle venant directement de l'oscillateur, à travers l'air — qu'il qualifie « d'action directe » de l'oscillateur. Malgré quelques difficultés dues à la superposition des effets statiques et dynamiques (particulièrement à de courtes distances), il met en évidence la propagation « d'ondes d'induction » à travers l'air, fin décembre 1887.

L'article traitant de ces premières expériences (« On the Finite Velocity of Propagation of electromagnetic Action ») est publié dans le numéro de février 1888 des *Wiedemann's Annalen*.⁸ Soucieux de donner une illustration plus directe de l'existence des ondes prédites par la théorie de Maxwell, Hertz utilise des feuilles de métal afin de réfléchir les perturbations électromagnétiques et de créer des ondes stationnaires. La localisation des nœuds lui permet de calculer la longueur d'onde des ondes ainsi formées. Les résultats de ces expériences sont publiés en juillet 1888 (« On Electromagnetic Waves in Air and their Reflection »).⁹ Par la suite, Hertz utilise sa version des équations de Maxwell pour le champ afin de calculer les forces créées par l'oscillateur et en déduire les formules de puissance rayonnée. Il réinterprète ses expériences en oubliant la vision helmholtzienne des forces électrostatique et électrodynamique, lui préférant une formulation en terme de forces électrique et magnétique.

Les résultats de Hertz sont accueillis rapidement dans de nombreux pays. Outre le pas im-

8. Hertz 1893, pp. 107-23.

9. L'article original est publié dans les *Wiedemann's Annalen*, vol. 34 p. 610. Voir Hertz 1893, pp. 124-36.

portant que représente la production d'ondes électromagnétiques par des moyens électriques, la simplicité du montage favorise la répétition des expériences dans d'autres laboratoires. Le dispositif sera dans certains cas amélioré (pour produire de meilleures ondes stationnaires), mais certaines interprétations divergent.

L'accueil des physiciens britanniques

L'aspect théorique de cette avancée est surtout apprécié en Grande-Bretagne. La découverte de Hertz ne constitue pas une vraie surprise pour les maxwelliens. Lodge reconnaît, dans les expériences de Hertz, des versions améliorées de ses propres expériences. FitzGerald a déjà manifesté un grand enthousiasme pour l'article de février 1888 et considère déjà ces premières expériences comme fondatrices. Néanmoins, ces résultats ne sont tout à fait explicites que pour les quelques scientifiques qui ont auparavant compris les implications de la théorie de Maxwell sur la propagation électrique. FitzGerald en est d'autant plus impatient de promouvoir la découverte de Hertz. Le colloque de Bath va lui fournir cette occasion.

Le colloque de septembre de la British Association de l'année 1888 se tient à Bath. Le discours d'ouverture de la section A (Mathématiques et Physique) devait initialement être prononcé par Arthur Schuster, qui est malade. C'est FitzGerald qui est nommé pour le remplacer au pied levé. Le 6 septembre, lors de son discours d'ouverture, il rend publiques les découvertes de Hertz — qui n'étaient alors connues que par très peu de personnes — et explicite les conséquences sur la nature des forces électromagnétiques. Soulignant que la théorie de Maxwell implique que les forces s'exercent à travers un milieu plutôt qu'à distance, il annonce que les expériences de Hertz sont les premières à pouvoir répondre à la question :¹⁰

On se souviendra de l'année 1888 comme celle où la grande question a été tranchée expérimentalement par Hertz [...] Désormais, j'espère qu'aucun étudiant ne manquera d'être impressionné par la théorie — et plus uniquement hypothèse — selon laquelle les actions électromagnétiques sont dues à un milieu pénétrant tout l'espace, et que c'est le même milieu que celui par lequel la lumière est propagée.

D'autres grands physiciens britanniques saluent le travail de Hertz, William Thomson et Lord Rayleigh en tête. La presse acclame également cette découverte, soulignant au passage la contribution de FitzGerald pour avoir attiré l'attention sur elle. Ainsi, les journaux scientifiques *Nature* et *Science* en font l'écho, comme le journal spécialisé *The Electrician*,

10. Hunt 1991, p. 160. Cite FitzGerald.

et même le *Times* salue « une découverte qui fera date ». ¹¹ Les maxwelliens contribuent à rendre plus connus les travaux de Hertz, notamment en traduisant plusieurs de ses articles dans les journaux anglophones. La théorie de Maxwell, et en particulier l'existence d'un milieu de propagation des ondes électromagnétiques qui constitue également l'éther lumineux, a trouvé une parfaite vérification. ¹²

La théorie de Hertz

Dans deux mémoires publiés en 1890 — « Sur l'électrodynamique des corps au repos » et « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement » —, ¹³ Hertz reprend la théorie de Maxwell en l'affranchissant des concepts qu'il lui paraissent trop difficiles à saisir. En effet, il reproche au Britannique un défaut de clarté. D'une part, le *Treatise* n'est pas un ouvrage cohérent, mais une somme d'éléments théoriques, Hertz y dénonce des contradictions entre les différents chapitres. D'autre part, comme beaucoup de ses contemporains, il a du mal à appréhender la notion d' « électricité » chez Maxwell, particulièrement à cause de la comparaison avec un fluide incompressible, et de « déplacement électrique ». Ainsi, il souhaite enlever les notions « non-essentiels » de la théorie : ¹⁴

La théorie devrait être construite de telle sorte qu'elle permette aux fondations logiques d'être facilement reconnaissables ; toutes les idées non-essentiels devraient en être retirées, et les relations entre les idées essentielles réduites à leur forme la plus simple.

De ce point de vue, la représentation de Maxwell n'atteint pas cet objectif ; elle oscille régulièrement entre les conceptions que Maxwell a trouvées naturelles, et celles auxquelles il est arrivé.

Pour lui, l'essentiel de la théorie de Maxwell est contenu dans les équations : ¹⁵

À la question « qu'est-ce que la théorie de Maxwell ? » je ne connais pas de réponse plus courte ou plus définitive que celle-ci : la théorie de Maxwell est le système d'équations de Maxwell.

11. « an epoch-making discovery », Hunt 1991, p. 160.

12. *Ibid.*

13. Hertz 1893, pp. 195-240 et pp.241-68.

14. Hertz 1893, p. 195.

15. Hertz 1893, p. 21.

Cette conversion, bien que rapide, ne s'est pas faite seule. Malgré des expériences décisives en faveur de la théorie de Maxwell, Hertz ne s'occupe pas en 1888 de la nature de la charge ou du courant électrique. Seule l'intéresse la propagation des forces \mathbf{E} et \mathbf{H} , qui ne nécessite que les équations dans le vide. L'échange avec FitzGerald et Heaviside commence peu à peu à convaincre Hertz de la supériorité des concepts maxwelliens. Hertz admet l'existence d'un éther électromagnétique, qui est caractérisé en tout point par les grandeurs \mathbf{E} et \mathbf{H} . Ce sera son leitmotiv pour toute la construction de sa théorie. Ainsi, Hertz définit la charge comme une grandeur arithmétique en fonction du flux de \mathbf{E} , et le magnétisme comme le flux de \mathbf{H} .¹⁶ Les vecteurs \mathbf{D} et \mathbf{B} , s'ils avaient une signification chez Maxwell, avec la distinction entre force et flux, ne sont pour Hertz que des alternatives à \mathbf{E} et \mathbf{H} , qui sont suffisants pour décrire le champ. Enfin, Hertz refuse l'obtention des forces à partir de la mécanique lagrangienne, ainsi que la prédominance du potentiel chez Maxwell.¹⁷

Concernant l'énergie électromagnétique, Hertz corrige Maxwell en considérant que l'énergie magnétique est $E_m = \frac{1}{2}\mu\mathbf{H}^2$, et non $E_m = \frac{1}{2}\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}$ comme le fait Maxwell.¹⁸ Dans le cas de l'énergie électrostatique, Hertz est en accord avec Maxwell en prenant $E_e = \frac{1}{2}\epsilon\mathbf{E}^2$. Hertz postule également les équations suivantes (pour des milieux isotropes) :¹⁹

$$\begin{aligned}\frac{\partial\mu\mathbf{H}}{\partial t} &= -\nabla \wedge \mathbf{E} \\ \frac{\partial\epsilon\mathbf{E}}{\partial t} &= \nabla \wedge \mathbf{H} - \sigma\mathbf{E}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Ces équations, postulées par Hertz — il évoque tout de même les lois expérimentales de Faraday et d'Ampère comme argument supplémentaire — sont pour lui, non un aboutisse-

16. Hertz différencie simplement l'électricité « libre », définie comme $\nabla \cdot \mathbf{E}$ et l'électricité « vraie », égale à $\nabla \cdot \mathbf{D}$. De même, le « magnétisme libre » est $\nabla \cdot \mathbf{H}$, le « magnétisme vrai » $\nabla \cdot \mathbf{B}$.

17. Dès le début de ses travaux, Hertz a en fait placé au centre de son raisonnement le « principe d'unité de la force électrique » postulant l'équivalence des forces électriques (force électrodynamique induite et force électrostatique), ce qui entraîne *de facto* une préférence pour les grandeurs \mathbf{E} et \mathbf{H} . D'autre part, Hertz a lui-même tenté de reformuler les bases de la dynamique sans utiliser l'approche lagrangienne. Voir sur ce point : Darrigol 2000 (b), p. 255.

18. Poincaré remarque que Maxwell, dans son *Treatise*, donne d'ailleurs deux expressions pour l'énergie magnétique, incompatible entre elles : $-\frac{1}{2}\mathbf{H} \cdot \mathbf{M}$ lorsqu'il étudie les aimants, et $\frac{1}{2}\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}$ lorsqu'il regarde les courants. Dans le cas où il n'y a pas de courants et uniquement des aimants, la seconde expression devrait être nulle, or \mathbf{B} est défini comme $\mathbf{B} = \mathbf{H} + \mathbf{M}$.

19. Hertz utilise le système de Gauss pour les unités, très proche du CGS gaussien encore utilisé de nos jours. Dans ces unités, les forces \mathbf{E} et \mathbf{H} ont même dimension, ce qui donne des équations symétriques $\frac{1}{c}\frac{\partial\mu\mathbf{H}}{\partial t} = -\nabla \wedge \mathbf{E}$ et $\frac{1}{c}\frac{\partial\epsilon\mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \wedge \mathbf{H} - \frac{\sigma}{c}\mathbf{E}$ où c est une vitesse, et représente une « constante intrinsèque de l'éther » ; ϵ/σ est le temps de relaxation de la force électrique. Par souci de cohérence nous avons gardé la convention habituelle avec les unités sur μ et ϵ .

ment, mais un point de départ à l'étude de l'éther :²⁰

Une fois ces équations trouvées, il n'apparaît plus opportun de les déduire (selon les travaux historiques) de conjectures sur la constitution électrique et magnétique de l'éther et sur la nature des forces mises en jeu, toutes ces choses étant entièrement inconnues. Il est plus opportun de commencer, à partir de ces équations, la recherche de conjectures plus poussées concernant cette constitution de l'éther.

Hertz préfère poursuivre sa démarche pour étendre la théorie qu'il développe à l'électrodynamique des corps en mouvement. Il est tout à fait conscient des difficultés posées par cet aspect, en particulier le lien entre éther et matière, et que cette étude nécessite « des hypothèses arbitraires ». Il choisit de traiter le cas le plus simple en faisant l'hypothèse d'un éther entièrement entraîné par la matière.²¹ La conséquence directe est qu'en tout point de l'espace on peut ne considérer qu'un seul et unique milieu. Hertz reste néanmoins tout à fait conscient de l'impossibilité d'expliquer certains phénomènes, comme nous le verrons plus loin. Il justifie son choix par la possibilité d'en expliquer d'autres.²²

L'autre hypothèse faite par Hertz concerne la conservation des lignes de force : si un ensemble de lignes de force passant à travers une certaine portion du milieu décrit l'état magnétique au départ du mouvement, et si l'on ne considère que l'effet du mouvement, alors les lignes de force passeront toujours à travers les mêmes particules du milieu. Hertz choisit d'ailleurs de définir les lignes de force selon les polarisations \mathbf{D} et \mathbf{B} , alors qu'il considère toujours que ces dernières sont redondantes, par rapport aux forces \mathbf{E} et \mathbf{H} , dans la description du champ.

Pour exprimer les variations des grandeurs en tenant compte du mouvement du milieu, définissons l'opérateur de dérivée convective $\frac{D}{Dt}$. Pour un flux \mathbf{F} :²³

$$\frac{D\mathbf{F}}{Dt} = \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial t} - \nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mathbf{F}) + (\nabla \cdot \mathbf{F})\mathbf{v} \quad (4.2)$$

où \mathbf{v} est la vitesse du milieu.

20. Hertz 1893, p. 201.

21. Cette vision permet de simplifier le formalisme car, selon lui, deux milieux distincts auraient nécessité deux vecteurs pour décrire chaque phénomène (électrique et magnétique).

22. *Ibid.*, p. 242.

23. $\frac{D}{Dt}$ correspond à la dérivée par rapport à une particule du milieu. En hydrodynamique, on parlerait de point de vue lagrangien. Pour les variations de flux et les dérivées convectives voir : Darrigol 2000 (b), p. 406 (annexe 5). Un flux est défini par Helmholtz comme une grandeur dont l'intégrale à travers une surface donnée se conserve.

Utilisant les deux hypothèses énoncées, Hertz obtient les équations :

$$\begin{aligned}\frac{D\mu\mathbf{H}}{Dt} &= -\nabla \wedge \mathbf{E} \\ \frac{D\epsilon\mathbf{E}}{Dt} &= \nabla \wedge \mathbf{H} - \sigma\mathbf{E}\end{aligned}\tag{4.3}$$

On retrouve le système d'équations 4.1, en changeant uniquement la dérivée temporelle en une dérivée totale. La similitude des deux systèmes d'équations entre les corps au repos et ceux en mouvement n'a rien de surprenant : elle découle de l'hypothèse de l'entraînement total de l'éther choisie par Hertz. La théorie ainsi formulée permet d'expliquer tous les phénomènes électromagnétiques connus.²⁴ Pour Darrigol, « avec cet électrodynamique des corps en mouvement Hertz amena la théorie de Maxwell au plus haut degré de perfection formelle ». Néanmoins, les difficultés restantes sont de taille. Outre les phénomènes optiques comme l'entraînement partiel de Fresnel — qui ne peut évidemment pas s'expliquer en tenant compte des hypothèses de Hertz —, un autre problème demeure, celui du principe de réaction. Les forces exercées par le champ électromagnétique font notamment apparaître un terme en $\partial(\mathbf{D} \wedge \mathbf{B})/\partial t$:²⁵

Cela signifiait une violation de l'égalité de l'action et réaction quand on l'appliquait à la matière seule. Que l'éther puisse avoir une inertie et une impulsion semblait vraiment très improbable à Hertz, bien qu'il lui attribuât une énergie et des contraintes.

Ce terme supplémentaire marque donc bien plus qu'une modification des équations. Dans la théorie de Hertz, l'éther change de rôle mais n'en est pas moins nécessaire. Il ne représente plus le milieu qui va supporter « mécaniquement » la propagation des forces électriques et magnétiques, puisque les équations utilisées par Hertz ne sont pas déduites d'un quelconque tenseur des contraintes. Mais il est indispensable dans le bilan des forces, sous peine de violer le principe d'action et réaction. Ce problème se retrouve avec une théorie formulée peu de temps après par Hendrik Lorentz.

24. Dans ses mémoires Hertz montre comment retrouver les différents phénomènes à partir de ces équations. Voir Annexe n°5 p. 447.

25. Darrigol 2000 (b), p. 157.

4.2 Les dernières théories de l'éther

L'expérience de Michelson et Morley

En 1881, le physicien Albert Michelson cherche à mettre un terme à la question de l'entraînement de l'éther. Sur ce point, deux théories en particulier se disputent. La théorie de Fresnel avance qu'un corps en mouvement entraîne avec lui l'éther à *l'intérieur* du corps, mais laisse parfaitement au repos l'éther à *l'extérieur*. La théorie de Stokes, pour sa part, considère que l'éther *autour* d'un corps en mouvement est lui-même mis en mouvement, et qu'il y a donc une certaine couche d'éther qui est entraînée avec le corps. Pour résoudre cette question, Michelson utilise un appareil se basant sur le principe des interférences lumineuses qu'il a lui-même mis au point. L'interféromètre de Michelson (voir figure 4.2) est un interféromètre à division d'amplitude, se composant de deux bras dont la longueur relative est ajustable pour faire varier la différence de marche. Sur le schéma, la source lumineuse est en S . Le rayon lumineux est séparé par une lame semi-séparatrice, envoyant une moitié de l'énergie lumineuse vers le miroir M_1 et l'autre moitié vers M_2 . Chaque partie du rayon fait un aller-retour avant de se réfléchir sur la lame semi-séparatrice et d'aller vers le détecteur T . À égales distances (configuration de « contact optique »), la différence de marche est nulle.²⁶

Si l'on considère que la lumière se propage à une vitesse c dans un référentiel absolu, qui est celui de l'éther, on peut calculer le temps nécessaire à faire un aller-retour le long des bras de l'interféromètre, qui est lui-même en mouvement dans ce référentiel. Pour le bras qui est parallèle au mouvement de la Terre sur son orbite (supposons ici M_1), le miroir va se déplacer en même temps que la lumière. En notant v la vitesse de la Terre (30 km/s), le temps pour faire un aller-retour est : $t_1 = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v}$, soit $t_1 = \frac{2lc}{c^2-v^2}$. Sur le bras transversal, on montre de la même façon que le temps d'aller-retour est : $t_2 = \frac{2lc}{\sqrt{c^2-v^2}}$. La différence de marche correspondante est (dans le vide au second ordre en v/c) $\delta = l\frac{v^2}{c^2}$. Si l'on tourne l'interféromètre de 90° , le décalage doit se produire dans l'autre sens, soit un décalage total entre les deux configurations de $\delta_{tot} = 2l\frac{v^2}{c^2}$.

Michelson tente de réaliser cette expérience en 1881 à Postdam. Son interféromètre a une distance « $l = 2.10^6$ longueurs d'onde de jaune », ²⁷ qui aurait dû suffire selon ses calculs. Mais

26. En pratique, la semi-séparatrice est une lame de verre dont un côté est légèrement métallisé pour devenir réfléchissant. Comme les deux rayons ne traversent pas cette lame un même nombre de fois (une et trois fois respectivement), une lame compensatrice est ajoutée sur le trajet d'un des rayons. Lorsque les miroirs sont parallèles mais à des distances différentes, la figure d'interférence représente les anneaux de Newton. La source utilisée pour les mesures est une source en lumière blanche, avec une longueur de cohérence très faible.

27. Michelson et Morley 1887, p. 336. Michelson précise que c'était le cas « dans la première expérience ».

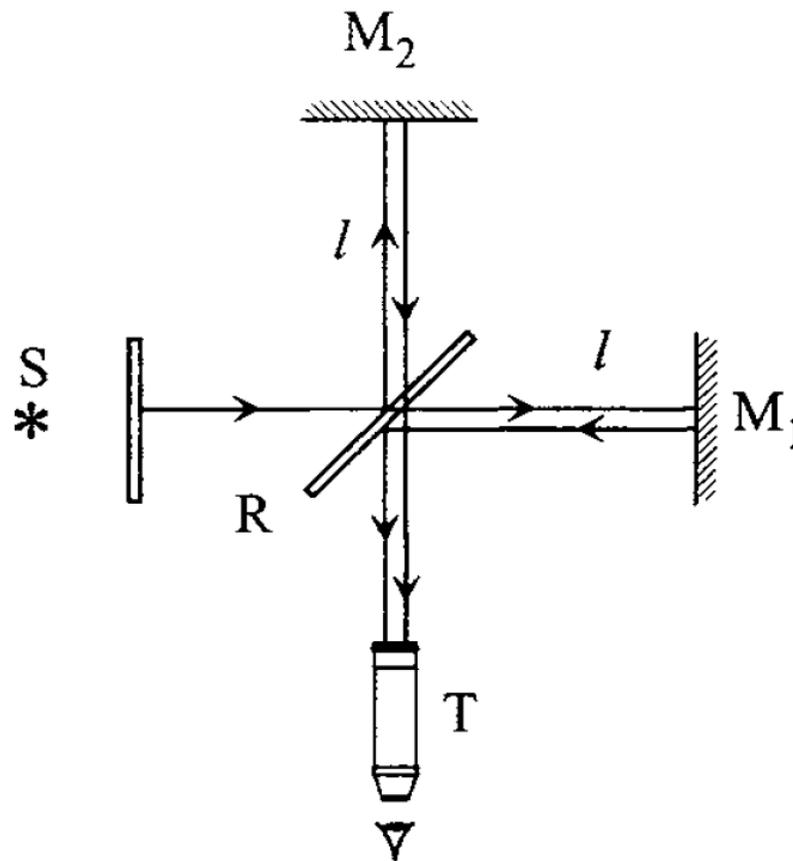


FIGURE 4.2 – Schéma de l'interféromètre de Michelson (tiré de Darrigol 2000 p. 317)

le physicien américain a surtout omis le terme dû au bras transverse, ce qui lui donne une différence de marche attendue deux fois trop grande. L'erreur est corrigée par Alfred Potier l'année suivante, mais les incertitudes expérimentales ne permettent plus de conclure. Avec un rapport $v/c = 10^{-4}$, on attend dans ces conditions un décalage de 0,04 franges, résultat deux fois plus faible que ce que Michelson pensait détecter. Cette correction est d'ailleurs apportée par Potier lors du séjour d'Albert Michelson en France entre l'automne 1881 et juin 1882, séjour pendant lequel il établit de bonnes relations avec les professeurs de physique à Polytechnique Jules Jamin, Alfred Cornu et Alfred Potier, ainsi qu'avec Éleuthère Mascart, professeur au Collège de France (voir chap. 5 et 6).²⁸

Lors de l'expérience de 1887, Michelson travaille avec le physicien et chimiste américain

28. En 1881, Jamin vient tout juste de laisser son poste de professeur à l'X à Alfred Potier. D'après Robert Shankland, la prise en compte du terme supplémentaire d'après Potier aurait dû donner un décalage nul, et non de 0,04 franges. Pendant son séjour en France, Michelson côtoie également Gabriel Lippmann, enseignant à la Faculté des sciences de Paris. Voir Shankland 1963, p. 22-23.

Edward Morley, à Cleveland. Il améliore son interféromètre pour que la longueur parcourue par la lumière dans un bras de l'interféromètre soit de $l = 2.10^7 \lambda_{jaune}$.²⁹ Il a également fixé l'ensemble sur une lourde pierre, elle-même posée sur un bain de mercure, afin d'éviter les perturbations extérieures d'une part, et de faciliter la rotation de l'appareil d'autre part (voir figure 4.3).

Malgré toutes ces précautions, Michelson et Morley ne détectent aucun décalage sensible en fonction de l'orientation de l'interféromètre par rapport à la Terre. Ils concluent en faveur de la théorie de Stokes, avec un éther qui est entraîné par la Terre dans son mouvement, et donc stationnaire par rapport à cette dernière :³⁰

Il apparaît, d'après tout ce qui précède, raisonnablement certain que s'il y a un quelconque mouvement relatif entre la Terre et l'éther luminifère, il doit être faible ; suffisamment faible pour réfuter entièrement l'explication des aberrations par Fresnel. Stokes a donné une théorie des aberrations qui suppose l'éther à la surface de la Terre au repos par rapport à celle-ci, et nécessite seulement que la vitesse relative dérive d'un potentiel [...]

Néanmoins, la théorie de Stokes pose un problème théorique : un an auparavant, en 1886, Hendrik Lorentz a mis en évidence une incompatibilité entre les hypothèses de Stokes, en l'occurrence que la vitesse d'un fluide incompressible à la surface d'une sphère ne peut pas dériver d'un potentiel et adhérer à la surface en tout point. Lorentz a également pris parti en faveur de la théorie de Fresnel, tout en conservant une certaine couche limite respectant l'entraînement partiel de Fresnel, proposant ainsi une hypothèse mixte. La même année, Michelson et Morley avaient d'ailleurs repris l'expérience de Fizeau de 1851 sur la propagation dans un fluide en mouvement, et retrouvé ce coefficient d'entraînement partiel. Mais après l'expérience de 1887, ils préférèrent conserver la théorie de Stokes :³¹

29. En prenant pour λ_{jaune} une valeur de 570 nm, on en déduit que les bras de l'interféromètre doivent être d'une longueur d'environ 10 m. En pratique, Michelson a disposé des miroirs de renvoie pour que la lumière parcoure plusieurs fois le bras.

30. Michelson et Morley 1887, p. 341.

31. *Ibid.*

[...] mais Lorentz montre que ces conditions [énoncées dans la citation ci-dessus] sont incompatibles. Lorentz propose donc une modification qui combine certaines idées de Stokes et de Fresnel, supposant l'existence d'un potentiel, et conservant en même temps le coefficient de Fresnel. Si désormais il était légitime de conclure à partir du présent travail que l'éther est au repos par rapport à la surface terrestre, selon Lorentz il ne pourrait y avoir de potentiel des vitesses, et sa propre théorie sera erronée.

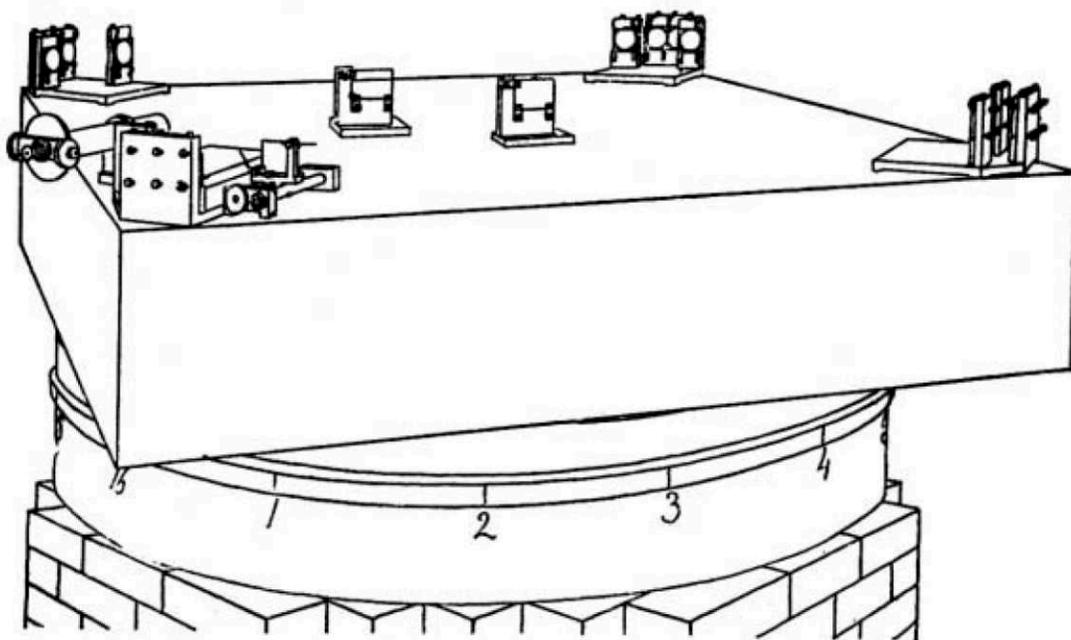


FIGURE 4.3 – Dessin du dispositif de l'expérience de 1887 (Michelson et Morley 1887).

La théorie de Lorentz

En 1892, Lorentz publie dans les *Archives Néerlandaises* un mémoire en français intitulé « La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants ». ³² Rappelant dans un premier temps les hypothèses de la théorie de Maxwell, il décrit ensuite sa propre théorie mettant en jeu des particules de matière électrisées libres de se déplacer dans l'éther. Cette hypothèse, qui ouvre la voie aux futurs électrons, peut se voir comme une innovation majeure autant que comme un amalgame des théories électromagnétiques, de Weber à Hertz. Elle permet également à Lorentz d'expliquer les phénomènes optiques,

³². Lorentz 1892.

comme le coefficient de Fresnel, mais pose certaines difficultés, notamment par rapport au principe de réaction.

Lorsqu'il écrit ce mémoire, Lorentz n'en est pas à son premier travail sur l'électromagnétisme, bien au contraire. Dès 1875, il a travaillé sur le problème des conditions à l'interface entre deux milieux, et retrouvé les lois de la réflexion et réfraction, en utilisant les équations de Helmholtz. Lorentz aborde ensuite le problème de la dispersion, en traitant le phénomène de manière microscopique, et considérant la polarisation comme résultant à la fois du milieu diélectrique emplissant l'espace (éther ou vide) et d'un terme de polarisabilité des molécules. Cette approche est, nous l'avons vu, plus en accord avec la vision helmholtzienne que maxwellienne, cette dernière ne prenant en compte que des quantités macroscopiques. Pour Lorentz, les molécules ne servent pas uniquement à modifier localement les propriétés de l'éther, mais sont des entités à part entière.

La pluralité des sources et des idées doit beaucoup au milieu scientifique dans lequel il évolue. Hollandais, Lorentz maîtrise le français, l'anglais et l'allemand, ce qui lui permet d'avoir accès aux contributions scientifiques de différents courants. D'autre part, il est assez favorable à l'hypothèse atomiste, peut-être influencé en cela par son compatriote Johannes Van der Waals.³³ Lorentz publie en 1878 une théorie de la dispersion se basant sur les mêmes hypothèses que pour son premier mémoire, avec des particules contenant de l'électricité. Il retrouve notamment la dispersion anormale.³⁴ Pour Darrigol :³⁵

Ce travail de Lorentz anticipait des traits essentiels de la future théorie de l'électron : la séparation de l'éther et de la matière, l'idée d'un couplage électromagnétique entre eux, et le rôle central des processus microscopiques. Bien que ce fût la première théorie électromagnétique de la dispersion, elle resta peu connue jusqu'au milieu des années 1890. Une raison plausible de cette négligence est que Lorentz publiait en hollandais et manquait de contacts personnels à l'étranger. Une autre est qu'avant les années 1890, il y ait eu peu d'amateurs potentiels, mis à part Helmholtz.

Lorentz reprend ses travaux en 1890, après les découvertes de Hertz. Concernant l'approche, il reprend la méthode lagrangienne de Maxwell, sans toutefois utiliser les potentiels,

33. Johann Van der Waals (1837-1923). Il introduit l'équation éponyme pour la description des gaz dans sa thèse de doctorat, soutenue en 1873.

34. Par opposition à la dispersion « normale », pour laquelle l'indice optique est décroissant avec la longueur d'onde, et donnée par la loi de Cauchy : $n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$ où A et B sont des constantes dépendant du matériau. La dispersion « anormale » ne peut s'expliquer qu'en tenant compte des phénomènes microscopiques.

35. Darrigol 2000 (b), p. 325.

et en accordant plus d'importance aux équations et au champ, à l'image de Hertz. Lorentz reprend l'analogie du fluide incompressible pour imager l'électricité, mais il souligne bien que cette comparaison, si elle permet une interprétation possiblement plus claire, n'apporte rien à la théorie de Maxwell, au contraire des équations qui sont fondamentales.³⁶ En revanche, pour ce qui est de la charge et du courant électrique, Lorentz n'assimile pas les notions de charge et de polarisation au sens de Maxwell, et reprend plutôt des caractéristiques de la théorie de Weber :³⁷

Selon cette manière de voir, une charge électrique est constituée par un excès de particules dont les charges ont un signe déterminé, un courant électrique est un véritable courant de ces corpuscules et dans les isolateurs pondérables il y aura « déplacement diélectrique » dès que les particules électrisées qu'il contient sont éloignées de leurs positions d'équilibre.

De plus, Lorentz considère qu'il n'existe pas de magnétisme autre que celui qui est créé par les mouvements des particules chargées, à l'image des courants particuliers d'Ampère.

Cette vision se justifie, pour Lorentz, par les connaissances portant sur le comportement des électrolytes, qui offraient une analogie poussée avec les hypothèses des théories précédentes sur les conducteurs. D'après lui, « des atomes des fluides électriques aux corpuscules chargés la distance n'est pas grande ».³⁸ D'ailleurs Lorentz reconnaît volontiers que les formules obtenues sont similaires à celles obtenues par Weber et Clausius dans les théories d'action à distance. Néanmoins, il soulève un point fondamental : dans cette nouvelle théorie, les particules interagissent entre elles via le milieu qui les sépare, et si certains mouvements d'une particule entraînent des réactions sur l'autre, c'est parce que ces mouvements ont fait varier l'état du milieu. Enfin, concernant la nature de ce milieu, toute la description de la propagation en est faite grâce aux équations. De plus, l'électricité, qui était constituée d'éther chez Maxwell, est complètement liée à la matière. Comme le dit Whittaker : « Un tel éther est simplement un espace pourvu de certaines propriétés dynamiques ».³⁹

L'approche calculatoire de Lorentz est, à nouveau, bien éloignée de la doctrine maxwellienne. Dans un premier temps, il considère en effet les mouvements d'une particule, et les variations des champs microscopiques \mathbf{e} et \mathbf{b} autour de celle-ci. En définissant une densité volumique de charge microscopique ρ_m sur le volume de la particule (et nulle en dehors), on

36. Lorentz 1892, pp. 391-2.

37. Lorentz 1892, pp. 432-3.

38. Lorentz 1892, p. 433.

39. Whittaker 1910, p. 420.

obtient les équations :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{e} &= \rho_m / \epsilon_0 ; & \nabla \wedge \mathbf{b} &= \mu_0 \left(\rho_m \mathbf{v} + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} \right) \\ \nabla \cdot \mathbf{b} &= 0 ; & \nabla \wedge \mathbf{e} &= -\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.4)$$

où \mathbf{e} et \mathbf{b} sont les forces électrique et magnétique prises localement (dans l'éther, Lorentz pose l'égalité de la force magnétique et de l'induction magnétique : $\mu_0 = 1$). D'autre part, il introduit un terme supplémentaire dans l'expression de la force électromagnétique exercée par le milieu sur la particule, en ajoutant un terme dépendant de la vitesse. La force totale s'exprime alors (par unité de volume) :

$$\mathbf{f} = \rho_m \mathbf{e} + \rho_m \mathbf{v} \wedge \mathbf{b} \quad (4.5)$$

Lorentz termine ce mémoire en s'intéressant aux corps en mouvement, notamment la propagation de la lumière dans les diélectriques. La transformation des équations (dans le cas d'une simple translation selon l'axe \mathbf{x} à une vitesse u) fait apparaître un changement dans l'opérateur de dérivation : $\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial x'^2} - \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial}{\partial t'} - u \frac{\partial}{\partial x'} \right)^2$, ce qui le pousse à introduire deux nouvelles variables pour faciliter la résolution des équations d'onde obtenues : $x' = \gamma x$ et $t' = t - \gamma^2 \frac{u}{c^2} x$, avec $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$. Si l'on reconnaît aisément un point de départ vers les transformations de Lorentz, il est nécessaire de préciser que dans un premier temps, le but de Lorentz est seulement de résoudre les équations de propagation des potentiels lorsque le diélectrique est en mouvement.

Cette première étape lui permet d'ailleurs de retrouver le coefficient d'entraînement de Fresnel, quelques mois plus tard, lorsque Lorentz passe aux équations macroscopiques en moyennant sur un volume suffisamment large. Il définit alors quatre vecteurs macroscopiques :

$$\mathbf{E} = \langle \mathbf{e} \rangle ; \quad \mathbf{B} = \langle \mathbf{b} \rangle ; \quad \mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} ; \quad \mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0 - \mathbf{M}$$

avec $\mathbf{P} = \langle \rho_m \mathbf{r} \rangle$ la polarisation moyenne due aux déplacements microscopiques de charges liées et \mathbf{M} l'aimantation moyenne due aux moments magnétiques microscopiques (moments cinétiques ou spins).

Les équations macroscopiques deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{libre} \\ \nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \wedge \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (4.6)$$

où l'on a défini $\rho_{libre} = \rho_m + \nabla \cdot \mathbf{P} = \rho - \rho_{lié}$ la densité de charges libres, et $\mathbf{j} = \langle \rho \mathbf{v} \rangle - \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} - \nabla \wedge \mathbf{M}$ le courant de conduction.

Pour retrouver les équations de l'optique, Lorentz considère que la polarisation est proportionnelle à la force électrique : $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}$ ce qui donne $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$, avec $\epsilon = 1 + \chi_e$. Dans le cas des diélectriques en mouvement, il introduit le vecteur $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$ qui est la force électrique apparente pour les particules du diélectrique en mouvement.

Lorentz montre que, pour un corps transparent en mouvement, la vitesse des ondes par rapport à ce corps est $W = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} - \frac{v}{\epsilon_r}$, avec la relation $\epsilon_r = n^2$ où n est l'indice optique (relation de Maxwell). Si le corps a une vitesse nulle, on retrouve bien une propagation à une vitesse $W_0 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$. Par rapport à un référentiel au repos, la vitesse est donc $W' = W_0 + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v$, où l'on reconnaît le coefficient d'entraînement partiel de Fresnel (voir Annexe n° 2).

En 1895, dans un mémoire portant « Sur les phénomènes électriques et optiques pour les corps en mouvement », ⁴⁰ Lorentz retrouve ces résultats en utilisant directement la théorie du champ. En exprimant les champs \mathbf{E}' , \mathbf{H}' et \mathbf{D}' dans le référentiel du corps en mouvement, et en introduisant sa variable de « temps local » $t' = t - ux/c^2$, Lorentz retrouve les mêmes équations que dans le référentiel de l'éther stationnaire. Il se base pour cela sur le « principe des états correspondants » : ⁴¹

Si, pour un système donné de corps au repos, un état de mouvement est connu dans lequel \mathbf{D} , \mathbf{E} et \mathbf{H} sont certaines fonctions de x , y , z et t , alors dans le même système dérivant avec la vitesse u , il existe un état de mouvement pour lequel \mathbf{D}' , \mathbf{E}' et \mathbf{H}' sont les mêmes fonctions de x , y , z et t' .

Lorentz utilise notamment ce principe pour expliquer l'invariance de phase et retrouver l'entraînement partiel. L'explication des phénomènes optiques est d'ailleurs la raison pour

40. Voir Lorentz 1895.

41. Darrigol 2000 (b), p. 329. Sur le principe des états correspondants voir aussi Janssen 1995, chap. 3.1. Dans son mémoire de 1895, Lorentz introduit une transformation des champs, en donnant les expressions $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$ (déjà présent dans son mémoire de 1892 dans l'expression de la force) et $\mathbf{B}' = \mathbf{B} + \mathbf{E} \wedge \frac{\mathbf{v}}{c^2}$.

laquelle Poincaré donnera sa faveur à cette théorie plutôt qu'à celle de Hertz, en dépit du fait que celle de Lorentz ne vérifie pas le principe de réaction (voir 11.3 p. 361). La théorie de Lorentz prédit que le mouvement de la Terre n'influe pas sur les phénomènes optiques, mais uniquement au premier ordre. Pour expliquer l'expérience de Michelson, qui ne détecte aucune influence de ce mouvement à l'ordre 2, FitzGerald, puis Lorentz, supposent une modification des longueurs entre les molécules, une « contraction » dans le sens du déplacement, approche qui suppose une contraction dynamique des distances moléculaires.⁴²

La théorie de Lorentz (que l'on datera de 1895, même si certaines idées sont présentes dès 1892) connaît un succès rapide, notamment grâce à des travaux expérimentaux. À la fin de l'année 1896, son élève Pieter Zeeman observe l'influence d'un fort champ magnétique sur une raie D d'émission du sodium (la raie D est le doublet d'émission à 589,0 et 589,6 nm), entraînant l'apparition de raies supplémentaires.⁴³ Lorentz en déduit que « l'ion » (au sens de particule chargée) émetteur a un ratio charge-masse q/m environ 2000 fois plus grand que celui de l'ion hydrogène. D'autre part, le 30 avril 1897, le physicien britannique Joseph John Thomson annonce avoir identifié dans le phénomène de rayons cathodiques la présence d'un « corpuscule » de masse bien plus faible que celle de l'hydrogène.⁴⁴ En 1898, Lorentz tire des mesures de dispersion la quantité q^2/m , et des mesures de son élève Zeeman le ratio q/m . Le rapport des deux lui donne une valeur proche du quantum électrolytique observé dans les électrolyses. Il adopte finalement la dénomination « électron » en 1899.⁴⁵

Ces preuves en faveur de la théorie de Lorentz sont reconnues en Allemagne en 1898, en particulier par Wilhem Wien, qui la présente lors du *Naturforscherversammlung* (Congrès des Naturalistes) de Dusseldorf. Pour expliquer les différents résultats expérimentaux, dont l'expérience de Michelson et Morley, Wien compare notamment la théorie de Hemholtz et

42. Sur la contraction de FitzGerald-Lorentz voir Janssen 1995, chap. 3.2. Cette approche sera réfutée par le physicien allemand Emil Cohn, qui construit une théorie de l'électrodynamique du début du XXe siècle. Cohn reprend avant tout les équations de Lorentz, en les considérant comme des équations phénoménologiques. Il propose une modification au deuxième ordre pour expliquer le résultat de Michelson et Morley. Voir Darrigol 2000 (b), p. 365-6.

43. L'« effet Zeeman » est le dédoublement de raies d'émission lorsque les corps (souvent les gaz) sont soumis à un champ magnétique intense. Il s'explique aujourd'hui par un terme supplémentaire dans l'énergie de l'électron (terme dépendant du champ magnétique dans le hamiltonien) qui entraîne une levée de dégénérescence du niveau.

44. Les rayons cathodiques, observés pour la première fois par Johann Hittorf dans les années 1870 (et nommés par Eugen Goldstein en 1876) sont l'apparition de rayons lumineux au niveau du pôle négatif (cathode) dans un tube à décharge rempli de gaz. Thomson montre que ces rayons ont une nature corpusculaire (de même que le physicien allemand Emil Wiechert).

45. Darrigol 2000 (b), p. 331.

celle de Lorentz :⁴⁶

Wien favorisa clairement l'éther stationnaire de Lorentz et la théorie ionique. L'assistance prestigieuse, Voldemar Voigt, Max Planck, Paul Drude, et Gustav Mie, étaient les champions d'une physique plus phénoménologique, dans la lignée de Franz Neumann. Ils apprécèrent néanmoins la force de l'argumentation de Lorentz. Deux d'entre eux, Drude et Planck, adoptèrent bientôt la théorie de l'électron.

La théorie de Larmor

La dernière théorie majeure de l'éther est à mettre au crédit du physicien irlandais Joseph Larmor. Ses travaux théoriques sont remarquables, avec un modèle d'éther qui va être construit au fur et à mesure en reprenant des idées de Thomson, Maxwell, Helmholtz, et même Lorentz. Mais plus encore que la pertinence du modèle d'éther, c'est la vision qui est donnée de l'éther en général qui connaît un tournant avec l'apport de Larmor, au gré des expériences optiques, surtout l'expérience d'interférométrie de Michelson et Morley (1887), que nous avons décrite plus haut, et celle de Lodge avec les plateaux tournants (1892), que nous décrirons ici. La difficulté pour Larmor d'expliquer les résultats négatifs des expériences l'amène à donner à l'éther un caractère incommensurable avec la matière ordinaire. C'est ce que Hunt appelle « l'éthérisation » de l'éther, c'est-à-dire « le processus par lequel celui-ci est graduellement privé de ses propriétés mécaniques et réduit à peu près à un vague arrière-plan pour les phénomènes physiques ». ⁴⁷

Passé par les bancs de Cambridge, Larmor commence par reprendre les idées de William Thomson, en particulier sur les modèles d'éther avec les vortex d'atomes. Il critique les idées de Maxwell, notamment la notion de déplacement, l'utilisation du lagrangien, qu'il trouve trop obscure, ou encore le lien entre éther et matière. Il vise à établir un modèle expliquant les propriétés de l'éther par le mouvement de ses constituants. En 1893, Larmor découvre l'éther rotationnel de MacCullagh en étudiant les différentes théories magnéto-optiques. Comme nous l'avons déjà vu, ce modèle avait permis à FitzGerald de retrouver les lois de la réflexion et de la réfraction ; le lien entre optique et électromagnétisme pour cette théorie était donc déjà fait.

La base mathématique de la théorie de MacCullagh, utilisant notamment le principe de moindre action, convainc Larmor que cet éther est l'étape finale recherchée. En outre, William

46. Darrigol 2000 (b), p. 329. La conférence de Wien est retranscrite dans un journal, voir Wien 1898.

47. Hunt 1986, p. 125. Hunt emploie le néologisme anglais *etheralization*, que nous choisissons de traduire par « éthérisation ».

Thomson avait montré que, par un assemblage astucieux d'éléments gyrostatiques, l'objection de Stokes fondée sur une violation du principe de réaction dans la théorie de MacCullagh pouvait être levée. Larmor expose son milieu dans son mémoire « *Dynamical Theory of the Electromagnetic and Luminiferous Medium* » à partir de 1893 à la *Royal Society*.⁴⁸ Reprenant l'interprétation électromagnétique que FitzGerald avait faite de la théorie de MacCullagh, Larmor peut traiter les phénomènes électriques et magnétiques.⁴⁹

La représentation sous forme de vortex posant quelques problèmes, notamment pour les courants électriques, Larmor abandonne ses vortex pour introduire de nouvelles particules, les « monades » qui sont « des singularités ponctuelles dans l'éther portant un quantum de charge électrolytique, positif ou négatif ». Il change de nom pour finalement appeler ces quantum « électrons », qui restent néanmoins les mêmes objets, des singularités dans l'éther : « L'inertie de tels électrons est entièrement électromagnétique, ou plus exactement : éthérée. La matière de Larmor n'est rien d'autre que des essaims de singularités dans l'éther ». ⁵⁰ Après la publication du mémoire de Lorentz de 1895, Larmor va s'inspirer du travail du hollandais, lui reprenant la méthode de l'approche microscopique en moyennant, le temps local, ainsi que les états correspondants, sans abandonner pour autant l'unité de son modèle, conservant à l'électron une nature éthérée.

Lodge, Larmor et l'éthérisation

Mais le mémoire publié par Larmor dès 1893 reflète une autre réalité : Larmor ne croit plus en un éther mécanique, constitué de matière ordinaire. Depuis un an, une expérience mise en place par Lodge contredit une conséquence de la théorie de l'éther rotationnel de l'Irlandais. L'expérience de Michelson et Morley, décrite plus haut, était plutôt favorable à la théorie de Stokes mais ne permettait pas de résoudre certains problèmes concernant les aberrations stellaires. Lodge décide alors de construire une expérience — qu'on pourrait qualifier avec Hunt « d'ingénierie lourde » —⁵¹ sur les conseils de Lord Rayleigh :⁵²

Une autre question qui pourrait, peut-être, être soumise avantageusement à un examen expérimental est de savoir si la propagation de la lumière dans l'air est

48. Larmor 1893.

49. Darrigol 2000 (b), p. 335-6.

50. Darrigol 2000 (b), p. 338-9.

51. Hunt 1986, p. 116.

52. *Ibid.*, p. 113. Cite Rayleigh.

affectée par le mouvement rapide de masses lourdes parallèles au rayon, et dans son voisinage immédiat.

Lodge travaille à l'université de Liverpool lorsqu'il commence, au printemps 1891, les plans pour sa machine tournante. Il souhaite observer l'action éventuelle de deux disques parallèles tournants à grande vitesse, entre lesquels passerait le faisceau d'un interféromètre (voir figure 4.4). Après quelques mises au point pour éviter les effets parasites dus à la rotation des plaques, Lodge montre en juillet 1891 que le déplacement de l'éther autour de celles-ci est quasiment nul, en dessous du dixième de longueur d'onde, ce qui suffit alors à contredire la théorie de Stokes (qui prédit un entraînement de l'éther au bord des plaques). Néanmoins, Lodge souhaite poursuivre les expérimentations plus avant, pour montrer de manière absolue que l'éther n'est pas entraîné.

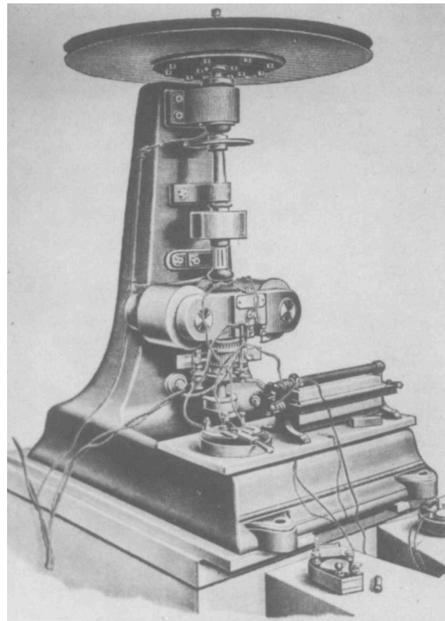


FIGURE 4.4 – La machine tournante de Lodge, constitué de deux plateaux d'acier de 90 cm de diamètres, mis en rotation par un moteur électrique construit spécialement délivrant environ 6700 W (tiré de Hunt 1986 p. 117).

À partir de mars 1892, Lodge améliore sa machine pour atteindre des puissances plus élevées, lui permettant de montrer que l'effet d'entraînement sur la lumière est d'au plus $1/200^e$ de la vitesse des plaques. D'autre part, il remplace les plateaux par une sphère plus grande et plus lourde, ce qui le conduit au même résultat. Lodge essaie enfin en aimantant sa sphère (par des moyens électriques), mais la force de champ magnétique — transverse

au trajet de la lumière — n'apporte pas plus d'effets sur celle-ci. Comme il le remarque, les rayons effectuant un aller-retour, la transversalité de la force magnétique peut annuler l'effet global. Lodge cherche donc à étudier l'effet d'une force magnétique longitudinale. En juin 1892, il met en place des solénoïdes géants en utilisant des tubes spécialement commandés, qu'il entoure de fils de cuivre (environ 7000 tours). Ainsi, un rayon lumineux traversant le tube dans le sens de la longueur subit la force magnétique, mais cette fois selon l'axe magnétique. Néanmoins, aucun résultat notable ne peut être mis en avant. Bien que les expériences soient imposantes, les résultats n'en sont pas réellement importants vis-à-vis des théories déjà existantes, aucune d'entre elles ne donnant un rôle central au magnétisme. Comme le note Hunt :⁵³

La motivation théorique de Lodge pour faire ces expériences de courant magnétique était à ce moment plutôt faible ; il avait un appareil très sensible et les fonds nécessaires à disposition, et était simplement en train de regarder l'effet sur la lumière de tout ce à quoi il aurait pu penser. Bien que plusieurs physiciens aient longtemps soutenu l'idée que le magnétisme puisse être associé à un courant d'éther, celle-ci ne faisait partie d'aucune théorie dominante lorsque Lodge commença ses expériences. À peine quelques mois plus tard, cependant, Larmor commença à proposer sa théorie de l'éther rotationnel, dans laquelle le courant magnétique prenait une place fondamentale.

À la fin de l'année 1893, alors que Larmor prépare son mémoire « *Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium* », Lodge lui envoie les résultats de ses expériences, ne montrant aucun courant d'éther prévu par sa théorie. Après que Lodge a recommencé les expériences à sa demande, Larmor doit revoir ses hypothèses sur la nature de l'éther. La première solution est de considérer l'éther comme suffisamment dense pour que, même à très grande vitesse, un flux d'éther soit indétectable. Mais d'après Lodge, il faudrait pour cela que l'éther soit aussi dense que le platine, valeur qui paraît aberrante à beaucoup de physiciens.⁵⁴ L'autre moyen d'expliquer les résultats expérimentaux, pour Larmor, est de se retrancher derrière les équations, considérant que l'éther est avant tout un concept décrit par les lois mathématiques. Dans une lettre à Lodge en décembre 1893 il écrit :⁵⁵

53. Hunt 1986, p. 126. Le « courant magnétique » dont parle Hunt est en fait un courant d'éther engendré par une force magnétique.

54. Dans le modèle du solide élastique les premières évaluations de W. Thomson donnaient pour l'éther une densité 10^{-18} plus faible que la matière ordinaire.

55. Hunt 1986, p. 129-30. Cite Larmor.

Si aucun courant d'éther ne peut être détecté le long des lignes magnétiques [...] la densité doit être de l'ordre de celle du platine et l'éther doit être absolument stationnaire sauf dans un champ magnétique. Ou peut-être vaudrait-il mieux dire que cette interprétation particulière des équations n'est pas directement vérifiée.

Pour protéger sa théorie, Larmor préfère donc considérer que l'éther est indétectable, et que le système d'équations est la description la plus complète qu'on puisse en faire. Il va d'ailleurs continuer dans cette voie en décrivant l'éther comme quelque chose relevant plus du concept que de l'objet physique. En janvier 1897, alors que Lodge lui adressait le résultat de nouvelles expériences, Larmor justifie l'absence de résultat positif en considérant l'éther comme « une vue transcendante », ne pouvant être détectée par aucun moyen physique.

Conclusion

La dernière décennie du XIXe siècle offre un tournant majeur concernant la conception de l'éther. Si les expériences de Hertz sur la propagation des ondes électromagnétiques ont fourni une preuve incontestable de la théorie de Maxwell et de son éther mécanique, cette vision est vite supplantée. Hertz préfère dans sa théorie se baser sur les équations reliant les grandeurs du champ électromagnétique, reprenant une voie ouverte par Heaviside, mais l'éther y est indispensable en tant que siège de tous les phénomènes et milieu universel. Lorentz, en enlevant à l'éther la charge électrique, permet de créer le lien entre la matière et les forces électriques et magnétiques qui faisait défaut dans la description des phénomènes optiques. Ce faisant, il ôte à l'éther la possibilité de propager « l'électricité », le laissant simplement siège de la propagation des forces. Larmor, après une tentative de modèle mécanique mise en défaut par l'expérience de Lodge, relègue l'éther à une entité incommensurable, peut-être non-détectable. Ainsi, en quelques années, l'éther est passé d'un élément dont la description mécanique n'était plus nécessaire à un simple espace ayant des propriétés dynamiques, puis à un milieu conceptuel.

Conclusion de la première partie

À partir des conceptions de Michael Faraday, qui attribue dans les phénomènes électriques et magnétiques une place fondamentale au champ, les théories électromagnétiques de l'éther se sont développées sur toute la seconde moitié du XIXe siècle. La « traduction » mathématique des idées de Faraday par James C. Maxwell a permis de jeter les bases d'une théorie, se fondant dans un premier temps sur un modèle dans lequel l'éther joue le rôle de milieu mécanique, puis en construisant des bases dynamiques, considérant l'éther comme le siège des énergies électrique et magnétique.

Après le décès de Maxwell en 1879, sa théorie est reprise par plusieurs physiciens britanniques, notamment Georges FitzGerald, Oliver Lodge et Oliver Heaviside, qui en poursuivent la construction, reprenant les idées ainsi que les méthodes de leur prédécesseur. FitzGerald et Lodge développent certains modèles mécaniques d'éther, Heaviside préférant une formulation mathématique en terme de forces de champ. Ils jouent également un rôle important dans la diffusion des idées de Maxwell. C'est le cas en Grande-Bretagne, où ils sont concurrencés par d'autres théories de l'éther comme le solide élastique de William Thomson, mais également sur le continent. La preuve expérimentale décisive en faveur de la théorie de Maxwell est réalisée en Allemagne, où Heinrich Hertz met en évidence l'existence d'ondes électromagnétiques en 1888.

Après avoir réalisé ses expériences, Hertz met en place sa propre théorie, dans laquelle il reprend en partie le cadre maxwellien, tout en laissant de côté certains concepts qu'il juge trop obscurs, dont les courants de déplacement. Il bâtit ainsi sa théorie de façon similaire à Heaviside autour des forces de champ, en attribuant une place primordiale aux équations reliant ces forces. Dans ces conditions, l'éther n'a plus de propriétés mécaniques mais il conserve un rôle central en tant que milieu de propagation des forces. Hertz cherche également à traiter la question du mouvement des corps dans l'éther. L'hypothèse selon laquelle l'éther est complètement entraîné par les corps en mouvement lui permet de vérifier les principes de la mécanique, mais est contredite par l'expérience.

Une autre voie est empruntée par le physicien néerlandais Hendrik Lorentz, qui mêle certains concepts maxwelliens à des concepts plus répandus sur le continent, comme les idées de Wilhem Weber sur la charge et la polarisation. De plus, il cherche à expliquer les phénomènes optiques, jusque-là expliqués par l'hypothèse d'Augustin Fresnel sur l'entraînement partiel de l'éther. Cet objectif l'amène à introduire des objets mathématiques comme le temps local, qui seront ensuite promis à un brillant avenir. Dans cette conception, l'éther est parfaitement immobile et non matériel, constituant ainsi un référentiel absolu pour l'écriture des équations

de Maxwell. Le physicien irlandais Joesph Larmor, dont certaines prédictions sont contredites par l'expérience, ira même plus loin en faisant l'hypothèse que l'éther est un concept immatériel, descriptible uniquement par les équations.

Ainsi, sur la seconde moitié du XIXe siècle, l'éther est passé, au gré des théories et des expériences (Fizeau, Michelson, ...), du statut de milieu mécanique primordial à celui de référentiel privilégié immatériel. Nous chercherons à savoir si toutes ces évolutions théoriques ont un écho dans les cours qui sont donnés dans l'enseignement technique supérieur, en particulier les cours de physique et d'électricité. Nous montrerons également que ces évolutions sont souvent connues des professeurs de ces écoles, qui publient des articles sur ces sujets (comme l'enseignant à Polytechnique Alfred Potier), ou fréquentent les chercheurs étrangers lors de congrès scientifiques.

Deuxième partie
L'éther et les théories électromagnétiques
dans les formations pour ingénieurs

Introduction de la deuxième partie

Les nombreuses écoles d'enseignement supérieur technique qui coexistent en France à la fin du XIXe semblent former, au premier abord, une mosaïque assez disparate. Afin de cerner un nombre restreints d'établissements dont nous pouvons détailler les cours, nous avons choisi celles qui sont considérées comme les principales écoles de formation des ingénieurs, d'après le constat que fait André Grelon dans l'ouvrage *Histoire de l'électricité en France*.⁵⁶ Ces établissements diffèrent sur plusieurs points, comme l'ancienneté ou le recrutement. Nous montrerons dans cette partie que l'examen approfondi du contenu des cours sur les sujets en lien avec l'électricité et le magnétisme permet d'identifier deux grandes catégories.

D'un côté, les « vieilles écoles » datant du XVIIIe ou du début du XIXe siècle (Mines, Ponts, Centrale, CNAM, ...) se mettent progressivement à l'électricité, réalisant l'importance croissante de la place de cette dernière dans l'industrie. L'enseignement de l'électricité y apparaît au milieu des années 1880, mais montre parfois certaines limites, notamment à cause de la présence récurrente des anciennes théories électrodynamiques françaises. Ce constat est d'autant plus présent à Polytechnique, qui fait figure d'exception en refusant l'enseignement orienté vers la pratique et en le déléguant à ses écoles d'applications.

Opposée à ces écoles assez anciennes, une seconde catégorie d'écoles, que nous désignerons comme les « nouvelles écoles », regroupe deux types d'établissements. On y trouve des écoles qui voient le jour aux alentours de 1880. Bien qu'elles aient des domaines de spécialité divers (École Supérieure de Télégraphie, École Municipale de Physique et Chimie Industrielles, Institut Montefiore de Liège...), ces écoles plus jeunes sont portées par la dynamique industrielle autour de l'électricité, ainsi que par le développement des nouvelles théories. Elles s'affranchissent ainsi du poids de la tradition intellectuelle française et de la physique du début du XIXe siècle. C'est par exemple à l'École Supérieure de Télégraphie que la théorie électromagnétique de Maxwell sera pour la première fois enseignée. L'École des Mines de Saint-Étienne, pour laquelle peu de documents ont été trouvés, sera traitée dans la troisième partie dans le chapitre consacré à Alfred Liénard.

Cette catégorie des nouvelles écoles inclut également les instituts électrotechniques qui naissent au tournant du XIXe et du XXe siècle dans les universités françaises. L'École Supérieure d'Électricité, créée sur le modèle de l'institut électrotechnique de Liège, s'inscrit dans cet ensemble. Orientés vers la pratique, ces instituts se refusent à enseigner les aspects théoriques de l'électricité. Ils sont à l'opposé des écoles plus anciennes, à la fois par leur ancrage provincial dans des secteurs industrialisés (Grenoble, Lille...) et par l'émergence d'une

56. Voir Grelon 1991, pp. 254-93.

nouvelle génération d'enseignants, formés à la suite de l'Exposition de 1881, à l'image de Paul Janet qui est à l'origine de l'institut électrotechnique de Grenoble avant de prendre la direction de l'École Supérieure d'Électricité.

Le chapitre 5, centré sur la tenue de l'Exposition Internationale d'Électricité de 1881, peint à grands traits le contexte académique aboutissant, à la fin du XIXe siècle, à une mosaïque variée d'établissements et d'acteurs. Les chapitres 6 et 7 abordent le « système polytechnicien », en étudiant le contenu des cours donnés par différents professeurs à Polytechnique (chapitre 6) et dans les écoles d'applications (chapitre 7), pour lesquelles l'abondance de sources primaires permet un suivi des cours sur une grande période (de 1870 à 1900). Nous montrons en discutant le contenu des cours et les différents documents administratifs (programmes d'enseignement, comptes rendus de conseils, ...) que ce système possède une inertie académique importante, qui peut lui causer préjudice dans une période de développement théorique et pratique rapide.

Enfin, le chapitre 8 traite dans un premier temps des autres établissements anciens comme l'École Centrale ou le CNAM, établissements civils dont les cours, s'ils montrent certaines similitudes avec ceux des écoles d'application, reflètent souvent la volonté de l'établissement.⁵⁷ Nous aborderons également dans ce chapitre les nouvelles écoles, en discutant largement les cours donnés à l'EMPCI et à l'École Supérieure de Télégraphie, qui contiennent de nombreuses références à la théorie de Maxwell, et en terminant par la naissance des instituts électrotechniques, qui sera discutée à travers la figure de Paul Janet.

57. Nous n'avons pas considéré dans ce travail le cas des Écoles d'Arts et Métiers. Dans les années 1890, le nombre de diplômés de ces écoles qui s'orientent vers le domaine de l'électricité est très faible, bien en-dessous de l'École Centrale par exemple (sur la période 1890 - 1900, le nombre de diplômés choisissant le domaine de l'électricité, de l'eau et du gaz est de 3% dans les EAM, soit 132 sur 4000, et d'environ 10%, soit 497 sur 4700, pour l'École Centrale. Voir : Day 1991, p. 30).

— Je vous avais pourtant bien
dit de faire attention . . .
— Aux fils, oui !... Mais ceci, ce
sont des câbles !...
— C'est tout différent !...

Hergé

Chapitre 5

Des Champs Élysées à Grenoble : la mise en place des institutions de l'électricité en France

La fin du XIXe siècle voit l'essor de l'enseignement spécifique de l'électricité à plusieurs niveaux. Dans les établissements déjà existants comme l'École des Mines de Paris ou l'École Centrale, des cours d'électricité sont instaurés. Une École Supérieure d'Électricité voit même le jour en 1894. Enfin, au sein des facultés de sciences, des instituts dédiés à l'enseignement technique sont créés. Dans ce chapitre nous établirons les différentes étapes de cette construction qui aboutit, à l'orée du XXe siècle, à un paysage varié en ce qui concerne l'enseignement de l'électricité. En premier lieu, l'émergence de ces écoles a pour origine la place croissante de l'électricité dans l'industrie. Comme le souligne le sociologue André Grelon : « L'histoire de l'électricité au XIXe siècle est celle du passage de l'étude d'un phénomène intéressant et complexe par des savants au sein des laboratoires à la maîtrise d'un flux d'énergie à des fins industrielles et finalement à son usage à des destinations domestiques ». ¹

La tenue, en 1881, de la première Exposition Internationale d'Électricité à Paris est un évènement important dans le développement de l'électricité au niveau industriel. Nous prendrons cette année comme référence en étudiant dans une première partie les formations académiques qui existent avant 1881. La deuxième partie sera centrée sur l'instigation et le déroulement de l'Exposition. Pour donner un rayonnement important à celle-ci, les plus grands spécialistes de l'électricité y ont été conviés et se réunissent au sein du Congrès des électriciens. Parmi eux se trouvent, à quelques exceptions près, tous les acteurs de l'enseigne-

1. Grelon 2006, p. 11

ment de l'électricité en France pour les vingt dernières années du siècle. La troisième partie mettra ainsi en avant la naissance des écoles après l'Exposition et le rôle des participants. Une exception est faite pour l'École Supérieure de Télégraphie, créée en 1878, que nous étudierons également dans cette dernière partie car nous verrons qu'elle s'inscrit pleinement dans cette dynamique d'application de l'électricité, et que les artisans de sa création se retrouvent au sein de l'Exposition.²

5.1 L'enseignement supérieur avant 1881

Certaines des écoles présentées par la suite et dont nous avons étudié les cours sont bien antérieures aux débuts de l'industrie électrique. Cette partie a pour but de faire un court, mais néanmoins nécessaire, résumé chronologique des grandes étapes de la création d'écoles supérieures avant 1881.

L'École Polytechnique et les corps de l'État

Les premières écoles d'enseignement spécifique, fondées vers le milieu du XVIII^e siècle, ont principalement des objectifs militaires. Ainsi, l'École des Ponts et Chaussées en 1747, et l'École royale du Génie de Mézières un an plus tard, forment des ingénieurs d'État. En 1783 un arrêt royal pose la création d'une École des Mines, « à l'instar de celle qui a été établie avec tant de succès [...] pour les ponts et chaussées » au sein de laquelle deux professeurs sont chargés d'enseigner les sciences nécessaires à l'exploitation des mines (chimie, minéralogie, docimasia, ...).³ Une quatrième école voit officiellement le jour en 1791, il s'agit de l'École des Ingénieurs Constructeurs, ingénieurs chargés de la construction des vaisseaux de la marine. En 1830, cette école deviendra de façon définitive l'École du Génie Maritime.⁴

L'entrée dans ces écoles se fait par concours et, si celui-ci est un temps réservé à la noblesse (l'ordre secondaire), il s'ouvre peu à peu au tiers-état et on note l'admission de savants devenus célèbres, comme Charles-Augustin Coulomb ou Gaspard Monge à l'école du génie de Mézières. Ce dernier sera également un des instigateurs de la création des deux grandes écoles de la Révolution, dont l'École centrale des travaux publics en 1794, qui sera renommée

2. Voir Grelon 1991, p. 258.

3. Aguillon 1889, p. 26. La docimasia est, en chimie, l'étude des minerais et de la séparation des constituants.

4. Duckett 1835, p. 22.

un an plus tard École Polytechnique.⁵ Les quatre écoles d'ingénieurs présentées plus haut deviennent alors des « écoles d'application » de l'École Polytechnique. Les futurs officiers suivent les cours de Polytechnique pendant deux ans, et acquièrent les bases théoriques notamment en mathématiques, avant d'intégrer une école d'application, selon leur classement au sortir de la deuxième année. Après cette école, ils obtiendront le grade d'Ingénieur des Mines, Ingénieur de la Marine, etc. et intégreront les services de l'État. Cette structuration est la naissance des « Corps de l'État ».

Avec la mise en place de ce système, on constate l'apparition d'établissements préparant exclusivement au concours de Polytechnique. Les lycées, créés sous l'Empire, sont alors des pièces essentielles dans l'enseignement. Comme le signale l'historien Bruno Belhoste dans son article sur la naissance de l'enseignement préparatoire : « Loin d'être un accident historique, l'implantation de l'enseignement préparatoire dans les lycées est donc pour eux une mesure fondatrice [...] ».⁶ Des cours de mathématiques spéciales, préparant spécifiquement au concours de Polytechnique, sont mis en place dans les lycées, dont les plus réputés se trouvent à Paris : Louis-le-Grand, Saint-Louis, Henri IV et Charlemagne sont les quatre établissements envoyant le plus d'élèves à Polytechnique. Les établissements de province ont plus de mal à atteindre cette réussite, à l'exception du collège de Metz.⁷ L'interdiction d'un enseignement scientifique hors du cadre de l'Université empêche des établissements privés de former eux-mêmes les préparateurs. En conséquence, des internats se développent, comme Brissaud ou Michelot, encadrant les élèves et les envoyant suivre les cours au sein des lycées voisins.⁸ Ce partenariat est mis à mal à partir des années 1840, lorsque certains lycées comme Louis-le-Grand ou Saint-Louis, choisissent de développer, sur le modèle de ces internats, leurs propres « classes préparatoires ».⁹

Les écoles d'ingénieurs civils et la question des diplômes

La demande de personnel qualifié, pour subvenir aux besoins d'une industrialisation sans cesse croissante, entraîne la création d'établissements de formation pour jeunes gens destinés à travailler dans les usines ou les entreprises privées, et plus uniquement dans les corps de l'État.

5. L'autre école étant l'École normale de l'an III, qui deviendra l'École normale supérieure de la rue d'Ulm. Outre leur création, Monge participe également à l'enseignement puisqu'il enseigne dans les deux établissements la géométrie descriptive. Sur les origines de Polytechnique voir : Belhoste 1989 ; Billoux 1989.

6. Belhoste 2001, p. 6

7. *Ibid.*, p. 7. Voir également note 1 de l'article.

8. *Ibid.*, p. 10.

9. *Ibid.*, p. 15.

Outre les Écoles d'arts et métiers, instituées sous Napoléon, qui forment essentiellement des techniciens qualifiés, on trouve l'École des Mineurs de Saint-Étienne, que nous aborderons dans le chapitre consacré à Alfred Liénard.¹⁰ L'École Centrale des Arts et Manufactures est créée en 1829 par des entrepreneurs, et le principal participant, Alphonse Lavallée, en devient le premier directeur. Cette école a pour but affiché de former des directeurs de manufactures, et se présente dès ses débuts comme une école généraliste. Les fonctions auxquelles sont destinées les étudiants centraliens valent à cette école le surnom « d'École Polytechnique civile ».¹¹ Parmi les établissements offrant des enseignements scientifiques et techniques qui voient le jour dans cette première moitié du XIXe siècle, on peut également citer le Conservatoire des Arts et Métiers. Créé en 1794 comme l'École Polytechnique, le Conservatoire ne propose des cours qu'à partir des années 1820, cours qui sont destinés à être « des cours scientifiques pour ouvriers ».¹²

Par la suite, peu d'écoles seront créées avant l'explosion due au développement de l'électricité. Parmi elles, on citera tout de même l'École Centrale de Lyon, créée en 1857, l'année même où l'École Centrale de Paris devient une école appartenant à l'État. Ce passage de l'école Centrale du privé à l'État n'est pas sans conséquence, notamment sur la question du diplôme. Car si le taux de naissance des écoles connaît un affaiblissement sur cette période, un autre débat apparaît peu à peu : celui du diplôme à donner aux étudiants qui sortent de ces établissements. Pour les écoles d'applications de Polytechnique, le grade d'ingénieur d'État est la sanction d'études reconnues. Pour les écoles destinées au civil en revanche, aucune distinction officielle n'existait, jusqu'à ce que l'École Centrale de Paris devienne école d'État et que pour la première fois un diplôme d'ingénieur civil soit reconnu. Faute d'uniformisation sur le plan national, chaque école possédait un diplôme qui lui était propre, les ingénieurs devenaient alors « diplômés de l'École N... ».¹³ Le terme de « grandes écoles », rarement usité avant 1850, se répand peu à peu et à partir de 1880 « on parle couramment des *grandes écoles scientifiques*, ou des *grandes écoles de l'État* ».¹⁴

L'enseignement au sein des facultés

10. Dans la suite la dénomination « École de Mines » est exclusivement réservée à l'école de Paris.

11. Sur l'histoire de l'école Centrale voir : Guillet 1929.

12. Fontanon et Grelon 1994, vol. 1, p. 29. Également dans *Histoire biographique de l'enseignement*, vol. 19 (1994), pp. 13-59.

13. Grelon 1991, p. 255 ; Grelon 1993, p. 48.

14. Belhoste 2001, p. 3. Les italiques sont nôtres.

Si plusieurs écoles se développent en cette première moitié du XIXe siècle, la situation dans les facultés reste sensiblement la même jusqu'à la fin du siècle. L'organisation reste celle mise en place sous Napoléon 1^{er}, avec l'existence de quatre facultés, deux professionnelles (médecine-pharmacie et droit) et deux académiques (lettres et sciences). Ces facultés demeurent indépendantes les unes des autres, et le développement d'un enseignement supérieur général n'y est pas aisé :¹⁵

Même si elles pouvaient être implantées dans une même zone géographique, ces facultés n'avaient nul lien entre elles, ni administratif ni scientifique. Chacune d'entre elles était directement rattachée au ministère chargé de l'instruction publique. Le rôle des professeurs était double : d'abord faire passer les grades académiques aux candidats ; ensuite, délivrer un cours public hebdomadaire. Pour ce qui concerne la passation des grades, il s'agissait essentiellement des baccalauréats ès lettres et ès sciences, les licences et plus encore les doctorats n'étant délivrés qu'à l'unité. Les activités de recherche, et notamment en sciences, n'étaient pas considérées comme prioritaires et par conséquent les crédits étaient parcimonieux et les équipements peu abondants et faiblement renouvelés. De fait, en lettres comme en sciences, il n'y avait qu'à Paris où un enseignement supérieur avait pu se développer.

Après le Second Empire, un diplôme de sciences appliquées est institué dans les universités mais les droits, élevés, limitent le nombre d'inscrits. Des missions d'étude sont envoyées dans les universités allemandes qui font déjà office de modèles. En 1863-1864, le ministère du Commerce, responsable de l'enseignement technique, organise « une vaste enquête sur l'enseignement professionnel, y compris supérieur. Les conclusions de ce travail préconisent la multiplication d'établissements similaires à l'École centrale des arts et manufactures ». Mais ces projets sont laissés, comme souvent à l'époque, à des initiatives privées. Un tournant arrive avec l'essor de l'électricité.¹⁶

5.2 L'exposition internationale d'électricité

Paris, le 20 novembre 1881. La première Exposition Internationale d'Électricité se termine. Depuis le 11 août dernier, près de 900 000 personnes sont venues au sein du Palais de

15. Grelon 2006, p. 4.

16. *Ibid.*

l'Industrie pour contempler moteurs, lampes, téléphones ou instruments de mesures.¹⁷ Plus de 1700 exposants ont été présentés par 16 pays, comme la France, l'Allemagne, l'Angleterre, mais aussi la Russie ou le Japon, et des industries comme les chemins de fer ou les sociétés d'éclairage ont montré dans leurs pavillons les avancées techniques les plus récentes sur l'électricité. Grâce aux éclairages installés tout autour du palais, illuminant les toits des maisons, Paris est devenue « la ville lumière ».¹⁸

Outre son rayonnement culturel sur un plan national, voire international, l'exposition est une date clé dans la construction des institutions des électriciens en France et à l'étranger.¹⁹ On retrouve dans son organisation tous les protagonistes des réformes, politiques et académiques, qui seront établies dans les années suivantes. En parallèle de l'exposition publique, le premier Congrès des électriciens se déroule à Paris, réunissant les plus grands spécialistes de l'électricité (Hermann von Helmholtz, William Thomson, Werner von Siemens, Gustav Kirchhoff, Galileo Ferraris, ...). Enfin, les bénéfices numéraires et sociaux de l'exposition serviront de base à la création du premier Laboratoire Central d'Électricité et de l'École Supérieure d'Électricité quelques années plus tard. En ce 20 novembre, les moteurs s'arrêtent, mais la grande machinerie de l'électricité continue de tourner.

Les prémices de l'exposition

Le genre de l'exposition comme moyen de vulgarisation et de démonstration des nouvelles avancées technologiques ne date pas de 1881. En effet, les expositions industrielles se sont succédées, depuis celle de Crystal Palace (Londres) en 1851, mettant chacune en avant les atouts des états organisateurs : industrie, commerce, colonies, etc. Lieu de rendez-vous pour la bourgeoisie du XIXe siècle, une exposition est un moyen original de toucher un large public afin de diffuser des idées nouvelles, et créer ainsi des besoins nouveaux chez les consommateurs, ce qui explique l'intérêt des financiers. En 1881, la nouveauté réside dans le fait de réussir à organiser un tel évènement autour d'un seul thème : l'électricité.

Un premier projet d'exposition sur le thème central de l'électricité a déjà été proposé en 1876 en Angleterre, à South Kensington, par le *Special loan collection of scientific apparatus*.

17. Le « Palais des Arts et de l'Industrie », construit pour l'Exposition Universelle de 1855 sur les Champs Élysées est détruit en 1897 en vue de l'Exposition Universelle de 1900 et remplacé par les actuels Petit Palais et Grand Palais.

18. Cardot et Caron 1991, p. 27

19. Sauf mention contraire explicite, l'exposition à laquelle nous feront référence par la suite est celle de 1881.

Un projet similaire est proposé un an plus tard en France par le comte Hallez d'Arros, alors secrétaire d'un journal spécialisé nouvellement créé, *L'Électricité*.²⁰ Cette nouvelle revue devait d'ailleurs servir d'organe de diffusion à l'exposition souhaitée, dont le projet échoua. Si l'exposition de 1881 peut finalement avoir lieu c'est dû, pour l'historien de l'électricité Alain Beltran, à trois raisons : une accélération du rythme des innovations, la constitution d'un milieu et l'arrivée d'un appui politique.²¹

Au niveau des innovations, on trouve dès 1871 une avancée majeure avec la description par Zénobe Gramme de la dynamo, considérée comme la première génératrice moderne de courant, en se basant sur le principe de l'anneau du physicien italien Antonio Pacinotti.²² En 1873, Hypolite Fontaine réalise le premier transport de force lors de l'exposition de Vienne. En 1875, Charles F. Brush introduit un régulateur pour les lampes à arc, permettant une augmentation de la durée d'utilisation en limitant la combustion des électrodes. Un an plus tard, Paul N. Jablochhoff crée la bougie électrique qui porte son nom, et qui sera utilisée pour éclairer l'avenue de l'Opéra dès 1877. La lampe à incandescence, introduite indépendamment par Thomas Edison aux États-Unis et par Joseph Swan en Grande-Bretagne, vient résoudre les problèmes des lampes à arc (voir Annexe n°8 p. 457).

Le développement et la diffusion de ces innovations se fait également grâce à un milieu en cours de constitution. La première pierre est posée par les télégraphistes qui publient, au sein des *Annales de Télégraphie*, les premiers articles sur l'électricité. Ce cercle, que l'historien Michel Atten désigne à son origine comme le « groupe des Annales »,²³ s'étend pour accueillir « des amateurs audacieux qui comprennent vite l'importance des innovations dont ils sont les contemporains ». Ainsi, le docteur Cornélius Herz crée dans les années 1870 le Syndicat français d'électricité. Il fonde également en 1879 le journal *La Lumière Électrique*, dont il confie la direction scientifique à l'ingénieur des Télégraphes Théodore du Moncel.²⁴

Dans son ouvrage dédié à l'École Supérieure d'Électricité, Girolamo Ramunni argue des rivalités entre télégraphistes et électriciens pour justifier le manque de soutien apporté dans l'organisation de l'exposition de 1877, les premiers étant inquiets de voir leur discipline devenir une petite partie des applications de l'électricité. Néanmoins, une exposition dédiée

20. Le journal *L'Électricité : Revue scientifique illustrée* paraîtra jusqu'en 1894.

21. Beltran et Carré 2016, p. 54.

22. Cette paternité est l'objet d'une controverse, mais il est reconnu que c'est bien Pacinotti qui a mis en œuvre le principe de fonctionnement qu'il décrit dans un mémoire en 1863, et Gramme a créé une machine plus perfectionnée, qu'il décrit en 1871. Les travaux de ce dernier semblent indépendants du premier. Source : « Gramme and the invention of the dynamo », *Nature*, 28 décembre 1946, p. vol. 158 (Notice bibliographique du livre : Pelseneer 1944).

23. Atten 1993.

24. Beltran et Carré, p.56-7.

à l'électricité permet au groupe des télégraphistes, seul domaine organisé de l'électricité à l'époque en France, de mettre en avant cette avance par rapport aux autres domaines de l'électricité. On peut donc penser que les télégraphistes sont plutôt partisans d'une telle manifestation.²⁵

Le troisième élément déterminant pour la réussite du projet d'exposition de 1881 est l'arrivée d'Adolphe Cochery au ministère des Postes et Télégraphes en février 1879. Cochery, favorable aux télégraphistes, dépendait jusqu'alors du ministère des Finances et occupait un poste de sous-secrétaire aux postes et télégraphes.²⁶ Il avait profité de sa position pour créer en octobre 1878 l'École Supérieure de Télégraphie. Cette école subira dix ans plus tard les conséquences d'un changement politique, avec l'absorption du ministère de Cochery par le ministère du Commerce, et deviendra essentiellement une école de formation pour les administrateurs des postes (voir page 146).

Si les conditions d'élaboration de l'exposition de 1881 restent floues, (Ramunni parle ainsi de décisions prises lors d'un dîner d'affaire), un rôle central est joué par Cornélius Herz. Parmi les autres protagonistes, on trouve d'ailleurs une large diversité : Jules Bapst, directeur du *Journal des débats*, Adrien Hébrard, directeur du *Temps*, le banquier Jacques de Reinach et Georges Berger, ancien élève de l'École des Mines et ingénieur des chemins de fer. Ils obtiennent le soutien d'Adolphe Cochery.²⁷

Le comité d'organisation est le reflet de la volonté de réunir plusieurs catégories de métiers. Autour du commissaire général Georges Berger — déjà coutumier des expositions universelles puisqu'il a participé à celles de 1867 et 1878, et plus tard à celle de 1889 — se retrouvent des scientifiques tels Edmond Becquerel, Éleuthère Mascart, Marcellin Berthelot, Jules Jamin, ou Jean-Baptiste Dumas ; des inventeurs comme Antoine Bréguet (X 1872, qui succède à son père Louis Bréguet à la tête des ateliers de la famille)²⁸ ou Théodore du Moncel ; des ingénieurs des télégraphes ; des représentants des chemins de fer ; des financiers ; des journalistes ; etc. L'État participe également en accordant une subvention de 300 000 F (en plus des 700 000 F récoltés par le biais d'une association privée de levée de fonds), et en prêtant le Palais de l'industrie.²⁹

25. Ramunni 1995, p. 27.

26. Ce poste nouvellement créé fait suite à l'absorption des télégraphes par l'administration postale six ans plus tôt.

27. Cardot et Caron 1991, p. 22-3, note 15. Le *Journal des débats* et le *Temps* sont des quotidiens à grand tirage, le premier datant de la révolution, le second de 1861. Herz et de Reinach furent mêlés au scandale du Panama en 1892. Herz partira en Grande-Bretagne, de Reinach se suicidera. La revue *La Lumière Électrique* changera de nom suite à cet événement, en 1894 pour devenir *L'Éclairage Électrique*. Voir chap. 10.

28. Source : Base Léonore, Dossier LH/355/96.

29. Cardot et Caron 1991, p. 20-5 . La somme de 300 000 F en 1880 représente environ 600 000 €.

Une exposition grand public

Nous n'avons pas ici pour objectif de détailler les différents exposants qui furent présents lors de l'exposition. Nous rappellerons simplement les éléments principaux sur sa présentation globale.³⁰ Les exposants sont répartis sur deux étages au sein du Palais de l'Industrie. Au rez-de-chaussée, une moitié du hall est réservée aux exposants français. On y trouve principalement des compagnies comme les chemins de fer (Chemin de fer de l'Ouest, Chemin de fer du Nord, Chemin de fer de P-L-M Paris-Lyon-Marseille) ; des compagnies d'éclairage (Société Jablochhoff) ou de moteurs (Société Gramme, Société Siemens) ; ainsi que des administrations (Ville de Paris, Ministère des Postes et Télégraphies, Ministère de la Guerre). L'autre moitié est dédiée aux exposants étrangers — 15 pays autres que la France, dont les principaux exposants sont l'Angleterre et l'Allemagne.³¹ À l'étage sont situées des salles dans lesquelles les électriciens et industriels présentent leurs appareils. L'exposition est organisée selon des groupes, ayant chacun trait à un aspect de l'électricité : production, transmission, électrométrie, etc. Parmi ces différents groupes, celui des applications de l'électricité est le plus présent et le plus attendu, avec des applications comme l'éclairage, les moteurs électriques, la téléphonie, l'électrochimie ou l'électricité médicale.³²

La principale qualité de cette exposition — qui était, paradoxalement, une source de questionnement sur son attractivité lors de son organisation — est la nouveauté proposée aux visiteurs, avec des stands dédiés uniquement aux technologies électriques, contrairement aux autres expositions universelles de l'époque. Le journaliste et écrivain Henri de Parville écrit alors :³³

Tout dans cette enceinte tient du merveilleux ; on n'était plus ici, comme dans les Expositions universelles, en face d'industries connues ; tout y était neuf, tout y était plein d'originalité et de surprise.

En particulier, le fonctionnement de toutes les machines comme les machines à coudre, les

30. Pour une description détaillée de l'agencement de l'exposition voir *La Lumière Électrique*, vol. IV (1881), p. 213-219 ; et Parville 1883, p. 1-12.

31. Henri de Parville donne la répartition suivante : 1764 exposants dont France, 937 ; Belgique, 208 ; Allemagne, 148 ; Angleterre, 122 ; Autriche, 37 ; Suède, 23 ; Espagne, 23 ; Norvège, 19 ; Pays-Bas, 18 ; Hongrie, 10 ; Italie, 8 ; Danemark, 5 ; Suisse, 4 ; Russie, 3 ; Japon, 2. Il ne donne aucun chiffre pour les États-Unis, qui auraient 197 exposants d'après cette répartition. Source : Parville 1883, p. 11

32. Cardot et Caron 1991, p. 27.

33. Parville 1883, p. 11-2.

scies ou les ventilateurs sans aucune force motrice apparente étonne fortement le grand public. La « transmission de mouvement » ou les « moteurs à vapeur ou à gaz » sont remplacés par « de simples fils de transmission ». ³⁴

Un aspect en particulier de l'exposition est la raison de son succès populaire : la volonté de toucher le plus large public possible. L'exposition a été conçue et mise en place pour faire de l'électricité un grand spectacle. En témoigne les descriptions faites dans les différents journaux de l'époque, peignant l'exposition à grands traits mélioratifs, et confinant parfois au fantastique : ³⁵

C'était le soir qu'il était préférable d'entrer pour la première fois à l'Exposition. Si l'on n'avait su d'avance où se trouvait le palais, on l'aurait bien vite deviné à la lueur qu'il projetait au loin sur la ville. On aurait dit que le feu était aux Champs-Élysées ou qu'une magnifique aurore boréale resplendissait à l'occident. La lumière s'échappait par les plafonds vitrés et allait éclairer les nuages. Deux puissants foyers électriques munis de réflecteurs et installés au sommet du portail de la porte d'honneur envoyaient leurs sillons étincelants sur l'Arc-de-Triomphe et la place de la Concorde. Tantôt la fumée des machines se rabattait dans la zone d'éclairage et prenait des tons pourpres et fauves d'incendie ; elle roulait des vagues lumineuses qui s'élevaient et s'abaissaient dans l'obscurité de la nuit. Tantôt, au contraire, l'espace était libre et le faisceau brillant ondulait et vibrail dans des scintillements éblouissants ; aux premiers plans, on la voyait courir sur la cime des marronniers, et la crête des feuilles s'allumait et prenait des tons d'émeraude on eût dit d'une pelouse ensoleillée suspendue dans les airs. Aux seconds plans, le rayon fouillait et embrasait les massifs humides il les couvrait de reflets chatoyants, et les petites gouttelettes de rosée tombaient lentement une à une comme des perles aux couleurs d'arc-en-ciel. Au loin, les maisons étincelaient au milieu d'une auréole blanche. Le coup d'œil était singulier, et l'on se serait cru volontiers transporté dans un pays de féerie.[...] Le palais des Champs-Élysées était bien devenu le véritable palais de la Lumière.

Si la description d'Henri de Parville peut paraître aussi élogieuse, le développement des dispositifs électriques aux alentours du Palais de l'Industrie a de quoi attirer l'œil du visiteur. Outre les dispositifs d'éclairage installés près du palais, grâce auxquels Paris ne tarde pas à

34. Parville 1883, p. 8.

35. Parville 1883, p. 4-5.

acquérir son surnom de « ville lumière », on trouve également un tramway électrique, développé par l'entreprise Siemens, transportant les visiteurs de la place de la Concorde au Palais de l'Industrie. Un ascenseur, de la même entreprise, a été installé dans l'aile Est pour monter au premier étage. Une fois arrivé en haut, la majorité des salles sont équipées de dispositifs d'éclairage variés. Chaque salle présente des appareils électriques destinés à des usages de particuliers ou de petites entreprises : paratonnerres, avertisseurs d'incendie, horloges, jouets électriques, ou lampes Edison. Le téléphone est notamment très prisé, avec un instrument développé par Clément Ader permettant d'écouter en temps réel les représentations de l'Opéra de Paris (le « théâtrophone »), et l'on trouve dans ces salles d'audition « de 3 000 à 4 000 personnes chaque soir », affluence plus que considérable.³⁶

Parmi ces dispositifs, l'éclairage électrique est largement mis à l'honneur, et les nombreuses présentations permettent de comparer les différents procédés. Comme le rapporte Louis Figuier, vulgarisateur scientifique de l'époque :³⁷

La véritable et grande nouveauté, on peut le dire, qui s'est révélée à l'Exposition internationale d'électricité (1881), c'est l'éclairage des appartements, l'éclairage domestique.

L'éclairage électrique avait déjà fait ses premiers pas dans le domaine public au moment de l'exposition, comme en témoigne l'éclairage de l'avenue de l'Opéra en 1877. En 1880, il s'était élargi à l'ensemble de la ville, en utilisant néanmoins des dispositifs variés : lampes des compagnies Lottin, Siemens, Jamin, système Reynier, bougies Jablockoff, etc.³⁸

Enfin, outre les démonstrations quotidiennes des exposants, des promenades-conférences sont également organisées. Très prisées du grand public, elles sont menées par des électriciens comme Théodore du Moncel pour la télégraphie, l'ingénieur des Arts et Manufactures Édouard Hospitalier pour les « usages domestiques », ou encore l'inventeur Hypolite Fontaine pour l'éclairage. L'accent est mis sur la vulgarisation, et « plus encore que lors de la visite des stands, la rencontre entre le public cultivé et curieux et les électriciens avait lieu dans ces conférences ». Hormis ces promenades, des conférences destinées au public sont également données par les membres du congrès qui se déroule en parallèle. Loin d'être négligées par les exposants ou les professionnels, ces conférences sont un moyen de faire valoir ses propres travaux théoriques ou pratiques. Car si le travail de présentation et de mise en valeur d'un stand peut relever de « l'évènement mondain », la participation à l'exposition est également

36. Parville 1883, p. 10.

37. Cardot et Caron 1991, p. 28. Cite Figuier.

38. Beltran 1991, p. 100. Voir Annexe n° 8 pour une description des systèmes.

Postes et Télégraphes, Adolphe Cochery. Il est constitué de 250 membres, venant de 26 pays, regroupant des physiciens, des ingénieurs du télégraphe, des inventeurs, etc. La délégation française, nommée par le ministre, comporte une majorité de physiciens, membres des plus hautes instances scientifiques, ainsi que des spécialistes de l'électricité, et quelques ingénieurs ou inventeurs : Edmond Becquerel et Jean-Baptiste Dumas, respectivement président et secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences en font partie, aux côtés de Jules Jamin, Marcelin Berthelot ou Hippolyte Fizeau, tous membres de l'Institut des Sciences, ou d'Alfred Potier, nouvellement en charge du cours de physique à Polytechnique et d'électricité aux Mines. Parmi les spécialistes de l'électricité, Théodore du Moncel, qui est directeur scientifique du journal *La Lumière Électrique*, Marcel Deprez, Édouard Blavier, directeur de l'École Supérieure de Télégraphie, Léon Lalanne, directeur de l'École des Ponts et Chaussées. On retrouve également le docteur en physique Jules Violle, le professeur au collège de France Éleuthère Mascart et le directeur des études de Polytechnique (et ingénieur-électricien) Ernest Mercadier parmi les membres du congrès. Outre la mainmise des grandes institutions comme l'Académie des Sciences ou l'Institut, on constate que tous les enseignants des écoles des corps de l'État sont présents (Polytechnique, Mines, Ponts et Chaussées, Télégraphie, ...). Au sein de cette assemblée de personnages académiques, quelques inventeurs détonnent, comme Paul Jablochhoff ou Hypolite Fontaine, alors président de la Chambre syndicale des électriciens.

Parmi les délégations étrangères, on retrouve certains des plus grands noms de la physique, comme William Thomson ou Hermann von Helmholtz. Sont également présents des spécialistes de l'électricité comme Galileo Ferraris, considéré comme « le père de l'électrotechnique italienne » et l'allemand Gustav Kirchhoff,⁴¹ et des inventeurs dont les créations tiennent les premiers rôles au sein de l'exposition : Werner Siemens, Graham Bell, Zénobe Gramme, Thomas Edison, etc. Si cette participation met en avant la naissance d'un véritable mouvement à l'échelle internationale, la cohabitation d'électriciens et ingénieurs français et étrangers sera d'ailleurs sources de tensions, liées aux rivalités entre constructeurs — les premières compagnies de brevets industriels se développent pendant cette période —,⁴² ainsi qu'à la place que la France tient à conserver en tant qu'organisateur :⁴³

41. Bracco 2017, p. 22.

42. Le Bureau des brevets de Berne, où Albert Einstein sera employé, est créé en 1888. Voir Bracco 2017, p. 174 en note.

43. Cardot et Caron 1991, p. 30.

Le congrès traduit à la fois l'existence d'un milieu international d'électriciens — scientifiques, ingénieurs et entrepreneurs — et la nette conscience de l'essor d'industries nationales concurrentes — maisons Siemens, Edison, Brush, Gramme...

Outre les rivalités financières pour les parts de marché, des rivalités intellectuelles survinrent, en particulier sur l'une des missions principales du congrès : l'établissement d'unités internationales pour l'électricité, qui restera la grande avancée de ce premier congrès.⁴⁴ En effet, depuis le début de la généralisation des travaux sur l'électricité en Europe, des systèmes d'unités divers s'était opportunément développés selon les pays. Cette étude du congrès sur l'unification des unités était d'ailleurs attendue par beaucoup. Ainsi, lorsque Frank Géraldy, le secrétaire de rédaction de la *Lumière Électrique* évoque les missions du congrès dans le numéro du 3 août 1881, il annonce :⁴⁵

La mission du Congrès est double. Il a d'un côté, au point de vue théorique d'importantes études à faire et des décisions indispensables à prendre. De l'autre, au point de vue pratique, tant comme jury que comme assemblée autorisée, il peut fournir des éléments d'examen et de comparaison impossibles à recueillir sans son aide et très difficiles à retrouver après l'occasion que nous offre l'Exposition. [...] En tête vient la question des unités ; [...] il faut, cela est indispensable, qu'on adopte un système unique d'unités et que ce système soit accepté et mis franchement en usage par tous et dans tous les pays.

Dans les autres points, Géraldy évoque une réflexion sur les appareils de mesure, la création d'une commission internationale des mesures électriques ; il mentionne également, d'un point de vue pratique, l'étude approfondie d'appareils électriques selon lui encore « mal connus » comme le téléphone, et des résultats de mesures faites lors de l'exposition. Au final, le système d'unités retenu est celui des Britanniques, présenté par W. Thomson (et soutenu notamment par Mascart), au détriment des unités Siemens, utilisées par les Allemands. En plus des unités comme l'*ohm* et le *volt* déjà existantes, on assiste à la naissance d'unités nouvelles : *ampère*, *coulomb*, et *farad*.⁴⁶

44. Sur la mise en place du système d'unités pour l'électricité voir : Blondel 1990.

45. *La Lumière Électrique*, vol. IV (1881), p. 145-8 et 209-11.

46. Les avis de certains scientifiques allaient parfois à contre-courant de ces tendances générales. Voir Ministère des Postes et Télégraphes 1882. Le système adopté, « centimètre-gramme-seconde », plus communément appelé CGS, est très proche de celui encore utilisé de nos jours dans les pays anglo-saxons. Les unités listées sont celles du système international et désignent respectivement les unités de résistance, de tension, d'intensité, de charge et de capacité.

Si le débat porte sur un point plutôt théorique, il résume parfaitement l'ambivalence qui ressort de ce congrès :⁴⁷

Ce débat [sur les unités à adopter] prouvait l'essor du domaine de l'électricité, la nécessité ressentie par tous de l'adoption de normes internationales, mais aussi les jeux d'influence nationaux, les rivalités, les inégalités de développement industriel. Réunis à Paris, les électriciens proclamaient l'existence de leur discipline scientifiques et de leur branche industrielle ; ils construisaient ensemble les bases de leur développement économique. Chacun restait cependant fier de son pays et encourageait son industrie nationale à étendre son marché à l'étranger.

Les unités électriques ne sont pas le seul point abordé lors de ce Congrès. En plus des séances plénières, des commissions réduites abordent des points particuliers, notamment les lignes télégraphiques et l'électro-physiologie. La réussite de ce premier congrès permet de mettre en œuvre une société pérenne regroupant les électriciens de tous les pays concernés. Cette création est une étape nécessaire pour asseoir les discussions théoriques, pratiques ou économiques menées lors de l'exposition.

De la SIE à l'ESE

C'est néanmoins sur fond de polémiques que la Société Internationale des Électriciens (abrev. SIE) est créée le 25 août 1883. Le monde des électriciens est clivé par les expériences sur le transport de la force à distance, comme celles de M. Deprez, partisan de l'utilisation du courant continu. Si sa démonstration lors de l'exposition de 1881 a été une réussite, il est vite concurrencé par Lucien Gaulard, plaidant pour le courant alternatif. Dans un contexte de rivalité, allant bien au-delà de la simple question théorique, la SIE est créée par des « figures historiques de l'électricité comme Jablochhoff, Jamin ou [Henri] Tresca », soutiens de Gaulard. Les protagonistes de l'exposition se mobilisent à nouveau, et Georges Berger, déjà commissaire principal de l'exposition, devient le président de la SIE. Le « générateur secondaire » (le transformateur) de Gaulard sera unanimement salué lors de l'exposition de Turin de 1884.⁴⁸

De son côté, Deprez est soutenu par plusieurs académiciens, dont le second secrétaire perpétuel Joseph Bertrand, des hommes politiques comme Paul Bert, ou l'homme d'affaire

47. Cardot et Caron 1991, p. 31.

48. Fontanon et Grelon 1994, p. 411. Sur la présentation de Gaulard à Turin en 1884 voir Bracco 2017, pp. 76-81.

Cornélius Herz, déjà instigateur de l'exposition. Mais après plusieurs échecs successifs lors d'expériences, notamment lors de l'exposition de Munich en 1882 puis entre Creil et Paris en 1885, une polémique éclate lorsque Deprez est accusé d'avoir modifié à plusieurs reprises les plans de son dispositif expérimental sur la liaison Creil-Paris, et il est abandonné par ses soutiens.⁴⁹ Symbole du clivage du milieu électricien français, si l'exposition internationale avait été très largement couverte par le journal *La Lumière Électrique* — appartenant à Herz —, la formation de la SIE, à laquelle Deprez et Herz ne participent pas, n'y fait l'objet que d'une brève, en date du 24 novembre, soit trois mois après la création officielle. On y trouve en particulier les missions que se donne la SIE :⁵⁰

Art. 2. - La Société Internationale des Électriciens, a pour but :

- 1- De centraliser, pour leur étude et leurs discussions, les renseignements et les documents concernant les progrès de l'électricité ;
- 2- De favoriser la vulgarisation et le développement de l'électricité par tous les moyens. À cet effet, elle exerce son action par des réunions, des conférences, des publications, des dons en instruments ou en argent, aux personnes travaillant à des recherches ou entreprises scientifiques qu'elle aurait provoquées ou approuvées ;
- 3- D'établir et d'entretenir des relations suivies et de solidarité entre les divers membres, français ou étrangers de la Société.

Les controverses au sein du milieu des électriciens profitent un temps à la communauté des télégraphistes. Après l'exposition, durant laquelle le pavillon du Ministère des Postes et Télégraphes est largement mis en avant, le ministre Adolphe Cochery réussit à se faire attribuer les bénéfices — conséquents — de l'exposition. Selon le règlement général de l'exposition, « après défalcation des remboursements dus aux souscripteurs du capital de garantie, les bénéfices acquis seront laissées à la disposition de l'État qui, sur proposition de la commission d'organisation, en fera profiter des œuvres scientifiques d'intérêt public ». Le capital de garantie constitué est d'un montant total de 700 000 F, et les bénéfices nets s'élèvent à 325 000 F. L'affectation de cette manne financière « avait, par un consensus, été portée à la création d'un laboratoire central de mesure qui n'existait pas en France ». Entre controverses scientifiques et changements politiques, les difficultés se succèdent et la création du laboratoire est repoussée de quelques années.⁵¹

Ce n'est qu'à partir de 1886 que le projet de laboratoire peut enfin prendre corps, avec

49. Fontanon et Grelon 1994, p. 409-11.

50. *La Lumière Électrique*, vol. X (1883), p. 415.

51. Grelon 2006, p. 16.

la déclaration de la SIE comme société d'utilité publique — condition nécessaire pour lui attribuer les bénéfices de l'exposition. L'année suivante, Éleuthère Mascart, déjà protagoniste essentiel du congrès de 1881 notamment pour ses talents de négociateur, avait été nommé responsable de la section « électricité » de l'Exposition Universelle de 1887. Respecté par ses pairs, il est rapidement accueilli puis porté à la tête de la SIE. Nouvel homme fort de la communauté des électriciens, Mascart va rapidement mettre en place le projet de laboratoire, tout en s'assurant du soutien des différentes institutions. Normalien, physicien, professeur au collège de France, et bénéficiant de relations dans les sphères politiques et académiques, Mascart s'impose comme un élément essentiel des rouages institutionnels dans le domaine de l'électricité.

Le Laboratoire Central d'Électricité est inauguré le 9 février 1888 à Paris. Habile négociateur, Mascart a pu obtenir des industriels qu'ils financent en partie sa création, en fournissant des instruments ou en souscrivant pour une certaine somme, et cette politique atteindra son but, les industriels ayant rapidement réalisé les intérêts qu'ils pouvaient tirer d'une telle structure. Parmi les premiers contributeurs, on retrouve ainsi la Société industrielle des téléphones, la Société Gramme, la Compagnie continentale Edison ou encore la Société d'éclairage et de force par l'électricité à Paris. Le directeur adjoint, nommé par Mascart, est Guillebot de Nerville, alors directeur de l'administration des Postes et Télégraphes. Passé par Polytechnique et l'École Supérieure de Télégraphie, il possède des relations dans les milieux des télégraphistes et peut traiter avec l'administration ministérielle. D'autre part, c'est un atout de poids pour Mascart pour apaiser les craintes de ceux qui pensaient que le laboratoire serait sous l'emprise des physiciens.⁵²

Le laboratoire se développe rapidement, et les premiers essais qui y sont réalisés lui permettent d'acquérir une certaine renommée, avec deux conséquences importantes. D'une part, les recettes issues des essais permettent de couvrir rapidement les frais engagés, ce qui donne au laboratoire une autonomie financière, et donc une émancipation vis-à-vis de la « tutelle contraignante du ministère qui gère l'administration des postes et télégraphes ». D'autre part, des étudiants commencent à fréquenter le laboratoire pour perfectionner leurs connaissances en électricité. Après un déménagement dans un local permanent, rue de Stael (Paris 15e) en 1893, le laboratoire met peu à peu en place des conditions d'accession pour les stagiaires, comme la détention d'un diplôme, et des conférences sont instituées au fur et à mesure. En 1894, une « école d'application » est officiellement créée pour l'électricité. La dernière pierre sera apportée par Mascart, avec la nomination d'un nouveau directeur, Paul Janet.⁵³

52. Rammuni 1995, p. 33.

53. Rammuni 1995, p. 33. Précisons que le terme « école d'application » fait référence au côté appliqué de

5.3 L'électricité industrielle : une dynamique globale, des vitesses variées

Si l'exposition d'électricité de 1881 est la locomotive de cette dynamique de création et de mise en place, elle n'est pas un évènement unique. Plusieurs structures sont créées ou modifiées à partir des années 1870 pour répondre à la demande de formation pour les ingénieurs en électricité. À la fin du XIXe siècle, les canaux de formation sont bien plus diversifiés : que ces structures soient centenaires comme le Conservatoire National des Arts et Métiers, ou totalement nouvelles comme l'Institut électrotechnique de Nancy, le panel d'établissements s'est ainsi considérablement élargi.

Les établissements spécialisés

Outre l'École Supérieure d'Électricité, plusieurs écoles centrées sur l'électricité ou sur ses applications industrielles, voient le jour. Peu avant la tenue de l'exposition d'électricité à Paris, on note ainsi la création d'une des premières écoles spécifiques en lien avec une application de l'électricité : la télégraphie. Ce domaine de l'électricité est sans conteste celui qui est le plus développé à l'époque. Les applications sont largement répandues, avec la communication par câble, y compris les câbles transatlantiques avec des premiers essais en 1857 et 1858 (le câble posé à l'été 1858 fut fonctionnel mais rompit au bout de trois semaines, probablement à cause d'une surtension).⁵⁴ Les réseaux de diffusion sont déjà établis, avec notamment le groupe des *Annales de télégraphie* évoqué plus haut (voir page 135). Enfin, au niveau institutionnel, l'existence du ministère des Postes et Télégraphes offre un soutien de poids à cette classe d'ingénieurs. La nouvelle école est à la fois la dernière pierre dans l'achèvement d'un cadre institutionnel pour les télégraphes, mais également la première école dédiée à une application de l'électricité. Bien que sa création soit antérieure à la tenue de l'Exposition, une approche non-chronologique permet de mettre en avant l'importance de cette école, par exemple à travers le devenir d'un de ses anciens élèves, Éric Gérard.

Réclamé depuis plusieurs années par la direction des Télégraphes — une première tentative de création d'école avait échoué en 1858 — le projet d'école va être monté par Adolphe Cochery, récemment nommé sous-secrétaire d'État, qui regroupe sous son autorité les Postes et Télégraphes. Le premier directeur de l'École Supérieure de Télégraphie (abrév. EST) est

l'électricité, et non à une arrivée dans le système de l'École Polytechnique.

54. Bart D et J. 2008.

Édouard Blavier, et les cours y sont donnés par des inspecteurs des Télégraphes.⁵⁵ Ces cours sont d'ailleurs d'un niveau élevé, l'objectif étant à terme de faire de l'EST une école d'application de Polytechnique. Les élèves sont ainsi recrutés à l'issue d'une formation supérieure (diplôme d'ingénieur ou licence de physique). La formation qui y est donnée va largement au-delà du cadre purement technique, avec des enseignements poussés sur les lois de l'électromagnétisme, un laboratoire de mesures électriques, des cours de langues étrangères, etc. Au sein de la première promotion de l'EST, on trouve notamment Éric Gérard, sortant de l'École des Mines de Liège, et qui sera nommé commissaire belge à l'exposition d'électricité deux ans plus tard. En 1883, Gérard sera à l'origine de la création de l'institut Montefiore de Liège, un des premiers instituts électrotechniques d'Europe, grâce au mécénat de Georges Montefiore-Lévi. Les cours donnés par Gérard à Montefiore feront référence au sein de la communauté des enseignants, particulièrement en France.⁵⁶

L'EST n'a pas pour but de former des ingénieurs spécialisés en électricité, mais plutôt des membres d'un corps de l'État. À l'inverse, une autre école voit le jour en France à cette période, cette fois peu après l'exposition, avec pour objectif de former des ingénieurs pour l'industrie : l'École Municipale de Physique et Chimie Industrielles (abrév. EMPCI).⁵⁷ Charles Lauth, chimiste réputé et auteur d'un rapport sur la place de la chimie à l'Exposition universelle de 1878, arrive à la conclusion de la nécessité de créer une école supérieure pour la chimie, branche dans laquelle la France accumulait jusqu'ici du retard par rapport à ses voisins européens. La politique de l'État refusant la création d'une école par les pouvoirs publics, Lauth se tourne vers le Conseil municipal de Paris, dont il a été membre de 1871 à 1880, et y a conservé plusieurs relations. En décembre 1880, trois membres du conseil municipal (Germer-Baillère, Bixio et de Lanessans) déposent un rapport proposant la création d'une école municipale de physique et chimie industrielles.⁵⁸

Une commission est nommée pour évaluer le projet, commission dans laquelle on retrouve notamment le chimiste Marcellin Berthelot et le physicien Antoine Bréguet, tous deux membres du comité d'organisation de l'exposition d'électricité, ainsi que Charles-Marie Ga-

55. L'EST est devenue depuis l'École supérieure des télécommunications, et porte maintenant le nom de Télécom ParisTech.

56. Grelon 2006, p. 13-4. L'institut technique de Darmstadt, puis l'Institut Fédéral Technologique de Zurich furent créés en 1882. Voir aussi : Fox et Guagnini 1993, p. 204.

57. On conservera l'abréviation EMPCI par la suite (à ne pas confondre avec les EPCI : Écoles Pratiques du Commerce et de l'Industrie qui voient le jour à partir de 1892). C'est aujourd'hui l'École Supérieure de Physique et Chimie Industrielles (ESPCI).

58. Municipalité de Paris 1882, p. 1. Également dans Grelon 1991, p. 268.

riel, professeur de physique aux Ponts et Chaussées.⁵⁹ La justification est, pour les membres de la commission, presque évidente : « Nous ne nous étendrons pas sur la nécessité de créer cet enseignement de la chimie et de la physique industrielles au point de vue théorique et surtout pratique. Depuis longtemps, déjà, nos savants les plus autorisés ont signalé le danger qui menace certaines de nos industries nationales, par suite des progrès réalisés à l'étranger dans ces mêmes industries ». ⁶⁰

Cette école est la première à envisager un enseignement adapté à l'industrie, avec des connaissances dans les différents domaines de la physique et de la chimie. Cependant, cette pluralité souhaitée a des inconvénients, qui se voient dès le lancement de l'établissement : ⁶¹

Les débuts furent indubitablement modestes. Alors que les étudiants pouvaient dédier les dix-huit derniers mois de leurs trois années de cours à la physique appliquée (au lieu de l'autre alternative, la chimie industrielle), l'électricité était en concurrence sur le temps et l'attention portée avec la thermodynamique, la mécanique, et la physique des solides et des gaz.

Le développement de la physique est donc miné par la compétition que se livrent les différents domaines, d'autant plus que le choix des étudiants se porte plus volontiers sur la chimie comme spécialisation : sur les trente élèves recrutés, seul un quart choisit la physique. Et ce en dépit de professeurs renommés, comme l'ingénieur des Arts et Manufactures Édouard Hospitalier, reconnu pour ses qualités de vulgarisation — qu'il avait mises à l'œuvre lors des promenades de l'exposition de 1881 —, secondé par un chef de travaux déjà réputé : Pierre Curie.

De manière générale, l'électricité et ses possibilités industrielles sont perçues par de plus en plus de gens comme un domaine incontournable. C'est le cas de Paul Janet, qui institue à Grenoble le premier cours d'électrotechnique au sein d'une université française. Normalien, Janet part à Grenoble sur les conseils de son mentor Jules Violle en 1886, après une période à Lyon. Bien que réticent à l'idée d'enseigner la science à des fins utilitaires, Janet change rapidement d'avis au contact des entrepreneurs de la région. Il faut souligner ici la situation de Grenoble, alors pionnière dans le développement industriel, avec des usines d'électrometallurgie et d'électrochimie déjà bien implantées. On se rappellera également que c'est ici que Deprez avait choisi de faire une démonstration sur le transport de force électrique entre

59. Municipalité de Paris 1882, p. 2.

60. *Ibid.*

61. Fox et Guagnini 1993, p. 204.

Grenoble et Vizille, utilisant la force génératrice des chutes d'eau — démonstration qui, si elle s'était conclue par un échec pour ce qui est du transport, n'en renforçait pas moins l'idée d'une grande capacité de production. Alors que la faculté des sciences souhaite mettre en place un cours de chimie industrielle, Janet fait une contre-proposition en faveur d'un cours d'électricité industrielle.

Faisant face à de nombreuses oppositions au sein de la faculté, il réalise un coup de maître en organisant, le 2 février 1892, un cours du soir, officiellement dédié à la physique industrielle. Janet aborde en fait uniquement l'électricité et ses applications dans l'industrie, devant un amphithéâtre plein à craquer, l'assistance comprenant notamment les industriels de la région et la presse.⁶² Janet reçoit même les félicitations du ministre. Ce succès lui permet d'obtenir des subventions des conseils municipal et général. Il met ainsi en place un cours d'électrotechnique à partir de l'année 1892-1893. Dans l'introduction, Janet commence d'ailleurs par y remercier « la Chambre de Commerce, le Conseil Municipal de Grenoble, et le Conseil Général de l'Isère ». D'autre part, dès la préface de son cours, il renvoie à des « traités plus poussés », dont le cours d'Éric Gérard. Après trois années d'enseignement à Grenoble, Janet sera appelé par Mascart pour prendre la tête de l'École Supérieure d'Électricité.

Une adaptation difficile dans les écoles plus anciennes

À l'image des réticences de la faculté auxquelles Janet a dû faire face pour introduire son cours d'électricité industrielle, la mise en place de cours au sein de « vieilles » structures est plus poussive que la création d'écoles spécialisées, entraînée par la dynamique autour de l'électricité. Ainsi, les « grandes écoles » presque centenaires, comme Polytechnique, l'École Centrale ou les Mines de Paris, ne vont intégrer des cours d'électricité que tardivement. Il en est de même pour le Conservatoire National des Arts et Métiers, où la première chaire d'électricité ne sera introduite qu'en 1890.

Les grandes écoles françaises, qu'elles aient pour visée de former des ingénieurs des corps de l'État ou des ingénieurs civils, font preuve d'une certaine inertie concernant l'introduction de l'électricité dans leurs cours. Concernant l'École Polytechnique, qui se place comme une école généraliste et théorique, il est peu probable de trouver dans ses cours des aspects portant sur l'application industrielle de l'électricité (qui n'apparaissent effectivement pas). Mais au sein de ses écoles d'application, on s'attend à trouver les notions qui sont fondamentales pour les ingénieurs des corps de l'État, pourtant celles-ci n'apparaissent que tardivement par

62. Grelon 1991, p. 819.

rapport à la prise de conscience globale sur l'avenir de l'électricité, autour de l'exposition de 1881 (à l'étranger, plusieurs instituts électrotechniques voient le jour dès 1882-3, voir notes p. 147). Ainsi, à l'École des Mines, elle n'est introduite qu'en 1887. On trouve dans le programme des cours de cette année là des leçons d'électricité, « leçons bien nécessaires à raison du rôle si important que joue l'électricité dans le monde moderne », ⁶³ preuve non seulement du rôle croissant de l'électricité, mais surtout de la prise de conscience autour de cette modification des rapports de force dans l'industrie. Les cours d'électricité industrielle sont donnés à Alfred Potier, qui s'occupe également des cours de physique.

Le constat est le même pour l'École Centrale, pour qui la transition vers l'électricité est mitigée. Malgré la présence de Hospitalier dans le comité d'organisation de l'exposition de 1881, aucun enseignant de l'école ne participe au congrès, à l'inverse de quasiment toutes les autres écoles ou facultés. L'enseignement de l'électricité de façon indépendante de la physique est introduit à partir de 1885 — ce qui en fait la première grande école à le mettre en place —, et confié à un ancien étudiant de l'école, Démétrius Monnier, étudiant de la promotion 1855 et praticien reconnu. Le cours de Monnier, largement diffusé et plusieurs fois réédité, se base en grande partie sur celui d'Éric Gérard. Une chaire d'électricité sera officiellement créée pour lui à partir de 1894, année de création de l'ESE. ⁶⁴ La proximité entre l'École Centrale et l'ESE est d'ailleurs plus qu'une coïncidence : les anciens étudiants centraliens bénéficient de facilités d'accès pour suivre l'année supplémentaire de formation proposée par l'ESE. Par décision du Ministère du Commerce, l'École Centrale peut en effet « subvenir aux frais d'étude d'un certain nombre de ses élèves, ayant satisfaits aux examens de sortie, et désireux de compléter leur instruction, au point de vue électrique, en suivant les cours de l'école supérieure d'électricité ». ⁶⁵ Si Mascart — bien qu'il ne soit plus directeur de l'école — reste le président du conseil de perfectionnement, le vice-président de ce conseil est Buquet, directeur de l'école Centrale. ⁶⁶ Il n'est donc pas étonnant qu'après de nombreuses années de partenariat entre l'école Supélec et l'école Centrale, celles-ci aient fusionné en 2017 pour devenir l'école CentraleSupélec.

Un autre indicateur de la capacité des écoles à former des ingénieurs compétents est le taux d'embauche dans les différents domaines de l'industrie. Pour illustrer ce point, prenons l'exemple des Écoles d'arts et métiers, dont les premières furent créées sous Napoléon. ⁶⁷ Ces

63. ENSMP 1889, p. 10.

64. Grelon 2006, p. 12-3.

65. ESE 1899, p. 4.

66. Paul Buquet, ancien élève de l'École Centrale des Arts et Manufactures (promotion 1853), fut directeur de l'école de 1895 à 1910. Source : « Nécrologie », *Le génie civil*, LXV (1914), n°26, p. 476

67. D'après l'association des écoles d'Arts et Métiers, la chronologie est la suivante : Châlons-sur-Marne

écoles avaient une vocation différente de celles évoquées plus haut, en orientant l'enseignement vers la pratique et la formation professionnelle. Le recrutement était également fait depuis les écoles primaires supérieures, contrairement aux grandes écoles « classiques » qui recrutait depuis le secondaire (voir Annexe n°7 p. 455). Les postes d'ingénieurs au sortir de ces écoles étaient assez diversifiés. Cependant, en 1904, les domaines les plus prisés restent l'ingénierie mécanique (environ 20 %), ou la métallurgie (env. 10 %), alors que la construction électrique représente moins de 1 % des postes. Si ces nombres restent à nuancer au regard des développements relatifs des industries, on peut penser que l'industrie électrique, alors en plein essor, propose une quantité d'emploi non négligeable par rapport aux autres industries mécaniques ou métallurgiques.⁶⁸

Instituts électrotechniques et écoles privées : une nouvelle approche

En 1897, les universités obtiennent de l'État un décret (en date du 21 juillet 1897) leur permettant de créer leurs propres diplômes scientifiques, différents des grades d'État (baccalauréat-licence-doctorat), dont l'attribution était jusqu'alors l'unique mission des universités. Une année auparavant, la loi du 10 juillet 1896 donnait la possibilité de former une université à partir de la fusion d'au moins deux facultés.⁶⁹ D'autre part, les structures ainsi créées peuvent gérer leur budget de façon autonome. Ce décret permet aux facultés les plus dynamiques de mettre en place des enseignements spéciaux, en particulier au sein d'instituts spécialisés. Dès 1900, on observe ainsi la création d'instituts électrotechniques, comme ceux déjà existant en Allemagne ou en Belgique : Nancy (1900), Lille (1900), Grenoble (1901) et Toulouse (1908). La création de tels instituts implique cependant des conditions pour que le projet soit mené à bien :⁷⁰ :

Il faut qu'une discipline soit parvenue à une maturité suffisante pour constituer un corps d'enseignement cohérent mais diversifié ; il faut disposer d'un potentiel de recrutement d'élèves suffisamment important pour parvenir à un flux régulier d'étudiants ; il faut régler la difficile question des modes de financement dont dépend

(1806) et d'Angers (1815) puis Aix-en-provence (1843), Cluny (1891), Lille (1900) et Paris (1912). Source : <https://www.arts-et-metiers.asso.fr/index.php/page/article/id/84-1-histoire-des-gadzarts>.

68. Valeurs prises depuis : Fox et Guagnini 1993, p. 53, tableau 2.2. La « construction électrique » ne prend pas en compte la distribution d'électricité dans les réseaux urbains, le pourcentage pour cette dernière regroupant aussi eau et gaz.

69. Grelon 2006, p. 8.

70. Grelon 2006, p. 91.

la réalisation matérielle de l'opération [...] mais par dessus-tout peut-être, il est indispensable que se constitue une véritable équipe pédagogique.

On constate que, si la question financière et celle sur l'équipe pédagogique restent propres à chaque facultés, les deux autres contraintes permettent de juger de l'état de l'électrotechnique dans les centres d'enseignements de façon beaucoup plus globale. En effet, la création — avec succès — de quatre instituts d'électrotechnique au tournant des XIXe et XXe siècles témoigne de la vigueur de l'industrie et de l'enseignement afférent, tant sur l'état des connaissances nécessaires à la formation qu'au potentiel de recrutement.

En parallèle de ces structures universitaires de province, des écoles privées se développent à Paris, qui ont pour but de former des « cadres techniques en électricité ». Ces écoles sont en partie la conséquence de la mise en place du concours de l'école supérieure d'électricité, concours qui se place dès ses débuts à un niveau élevé d'exigence, pour que le niveau des entrants sur concours soit similaire à celui des admis sur titre, comme les polytechniciens ou centraliens. En cinq ans, se créent à Paris quatre de ces écoles préparatoires : Bréguet, Charliat, Sudria et Violet.⁷¹

Au sein de ces établissements, on retrouve des similarités. Tout d'abord, l'objectif affiché est de former des contremaîtres de niveau satisfaisant dans le domaine de l'électricité, pendant des élèves des arts et métiers en mécanique. Les différentes équipes enseignantes sont constituées de professeurs de physique ou d'ingénieurs, et l'enseignement pratique y tient une place prépondérante. Les entrées se font sur simple accord du directeur, et le niveau de recrutement est le brevet d'études primaires supérieures, ou la première partie du baccalauréat pour les élèves du secondaire (sur cette période il existe un unique baccalauréat classique, divisé en deux parties, voir Annexe n°7). Si l'entrée à l'école est plutôt accessible, le contrôle de connaissances à la fin de la scolarité est sévère : seuls 30% environ des élèves obtiennent le diplôme de sanction des études. L'examen est de plus passé devant un jury composé de professionnels extérieurs à l'école, et dont les titres sont mis en avant dans les brochures des établissements : diplômé de l'ESE, de l'École des arts et métiers, de l'école Centrale, etc.⁷²

Conclusion

L'Exposition de 1881 marque un moment important dans le développement de l'électricité.

71. Grelon 1991, p. 825.

72. *Ibid.*

Elle ne constitue pas véritablement un point de départ, puisque de nombreux dispositifs de production (comme la dynamo Gramme), de transport ou d'éclairage ont été conçus avant cette date ; autour d'un domaine d'application comme la télégraphie, certains intervenants n'ont pas attendu 1881 pour constituer un véritable corps d'État disposant notamment d'un ministère et d'une école. Mais cette exposition représente indiscutablement un tremplin. Succès populaire considérable, l'exposition est renouvelée de façon annuelle, souvent autour de thèmes précis : expositions de Munich 1882 sur la transmission de force, Vienne 1883 sur le stockage de l'électricité, Turin 1884 qui consacre le transformateur de Gaulard-Gibbs, etc.⁷³ L'électricité, après être passée « de la curiosité de laboratoire » au domaine industriel, entre dans le domaine mondain. La petite nouvelle ne tarde pas à se faire une place aux côtés des grandes avancées du XIXe siècle. L'exposition universelle de 1889, qui célèbre le centenaire de la Révolution, consacre également « le siècle de la vapeur, des chemins de fer et de l'électricité ».⁷⁴ Pendant l'exposition universelle de 1900, l'électricité devient reine.⁷⁵

La rencontre de nombreux industriels, et la rivalité pour conquérir un marché prometteur, favorisent les inventions. L'éclairage électrique, avec ses nombreux types de lampes et bougies, en est l'illustration : il faut tout le talent d'un Edison pour promouvoir victorieusement son dispositif. Au niveau théorique, le Congrès a largement discuté sur les unités à utiliser, pour les travaux théoriques comme dans la pratique. Enfin, le monde institutionnel français ne reste pas insensible aux appels de cette nouvelle science. Les écoles, presque toutes représentées à l'exposition (à l'exception de Centrale) ne peuvent raisonnablement ignorer l'importance croissante des applications de l'électricité, ce qui les pousse à créer des enseignements spécifiques. Intéressons-nous maintenant au contenu de ces cours de physique et d'électricité, en commençant par l'enseignement donné à l'École Polytechnique.

73. Sur les expositions d'électricités successives voir : Bracco 2017, pp. 59-89.

74. Cardot 1989. L'auteur cite un journal de l'époque, le *Guide Bleu du Figaro et du Petit Journal*.

75. *Ibid.*

La raison étant l'essence et l'origine des mathématiques, tout homme qui base chaque chose sur la raison, et juge des choses le plus raisonnablement possible, peut, avec le temps, passer maître dans n'importe quel art mécanique.

Daniel Defoe

Chapitre 6

L'électromagnétisme à Polytechnique

L'École Polytechnique occupe dans le paysage des institutions françaises une place primordiale. D'une part, elle forme au niveau théorique les ingénieurs des corps de l'État. D'autre part, elle jouit d'une réputation fondée sur les travaux de plusieurs anciens professeurs et élèves. Le niveau, notamment mathématique, des professeurs et des élèves y est excellent, et nombre de ces enseignants contribuent activement à la propagation des idées de Maxwell en France. Les conditions semblent donc réunies pour observer une transformation en lien avec les évolutions théoriques de l'électromagnétisme.

Les trois premières parties constituent une focalisation progressive sur le thème de l'électromagnétisme et de l'éther. La première partie aborde l'importance que Polytechnique accorde à la physique, présente son fonctionnement et les enseignants qui s'y succèdent. La deuxième partie précise le contenu des cours de physique, en particulier sur les questions de l'optique et des phénomènes électriques et magnétiques, et la troisième partie s'intéresse particulièrement à la question de l'éther, en optique et en électromagnétisme. Dans la dernière partie nous montrerons que l'électricité reste une discipline en marge de Polytechnique, malgré les évolutions rapides, illustrées par de nombreuses manifestations, comme les expositions.

6.1 La place de la physique dans l'enseignement

Organisation

Créée au lendemain de la Révolution, l'École Polytechnique (surnommée l'« X ») est la pierre angulaire de l'enseignement supérieur français au XIXe siècle. Pour le futur ingénieur

de l'État, elle constitue la première étape de son parcours — si l'on excepte la classe préparatoire —, lui assurant une formation théorique de haut niveau avant de rejoindre une école d'application, où un enseignement plus technique lui sera donné. En 1880, Polytechnique peut s'enorgueillir d'avoir déjà formé de nombreuses générations d'ingénieurs, pour lesquels le titre « d'élève de l'École Polytechnique » est signe de qualité. Parmi eux on trouve les plus illustres scientifiques français du siècle, passés par Polytechnique : Jean-Baptiste Biot et Étienne-Louis Malus (X 1794), François Arago (X 1803), Augustin Fresnel (X 1804) pour les physiciens ; Siméon Denis Poisson (X 1798), Augustin Cauchy (X 1805) ou encore Joseph Liouville (X 1825) pour les mathématiciens. Les professeurs sont recrutés parmi les promotions d'anciens élèves, comme Arago et Cauchy qui enseigneront respectivement la géométrie analytique et la mécanique.¹

Le recrutement, qui se fait sur concours, a rapidement donné naissance à des établissements spécialisés qui préparent au concours d'entrée de l'école (comme le lycée Louis-le-Grand à Paris). À la fin du XIXe siècle, les promotions d'élèves polytechniciens comptent environ 250 élèves, âgés de 17 à 21 ans. La scolarité se déroule sur deux ans, pendant lesquels les élèves passent de la deuxième division (première année) à la première division (deuxième année).² Ces deux ans sont ponctués d'examens permettant d'établir un classement. Outre les professeurs, qui peuvent avoir une ou plusieurs chaires, des répétiteurs (titulaires ou auxiliaires) sont chargés de faire travailler le cours aux élèves.

À la fin de la deuxième année, le classement définit l'école d'application vers laquelle l'élève peut se tourner (voir chapitre suivant). Les cours sont nombreux, avec pas moins de onze matières examinées au cours de l'année :³

- Pour les matières scientifiques, dont le coefficient est de 10 : Analyse ; Mécanique ; Géométrie descriptive (seulement en première année) ; Stéréotomie ; Astronomie ; Physique ; Chimie.⁴
- Pour les autres matières, dont les coefficients varient entre 1 et 5 on trouve : Littérature et Histoire ; Dessin et épures ; Architecture ; Langue allemande.

Seules les matières scientifiques sont présentes à l'examen final.

1. École Polytechnique 1895. voir aussi Belhoste 1989.

2. École Polytechnique 1894 (a).

3. École Polytechnique 1889.

4. La stéréotomie est la « Science traditionnelle de la coupe des matériaux employés dans la construction. ». Source : Dictionnaire Larousse (<https://www.larousse.fr/>).

Chaire n ° 1		Chaire n ° 2	
Enseignant	Dates	Enseignant	Dates
Auguste Bravais	1845-1856	Jules Jamin	1852 - 1881
Henri de Sénarmont	1856-1862		
Émile Verdet	1862-1866		
Charles-François Cabart-Danneville	1866-1867		
Alfred Cornu	1867- 1902	Alfred Potier	1881-1895
		Henri Becquerel	1895 - 1908

FIGURE 6.1 – Tableau donnant la liste des professeurs titulaires des chaires de physique à l'École Polytechnique pour la seconde moitié du XIXe siècle.⁴

Place de la physique et enseignants

Si l'on s'intéresse de plus près à la physique, on constate qu'elle tient une place relativement importante dans l'enseignement. À partir de 1852, une deuxième chaire de physique est créée à l'école (voir tableau 6.1), et les professeurs alternent d'une année sur l'autre entre le cours de première et de deuxième année. Par conséquent un enseignant garde la même promotion lorsque celle-ci passe en deuxième année. Les élèves n'ont donc qu'un seul professeur pendant leur formation à Polytechnique.

Le volume horaire est de 30 leçons par année, de 1h30 chacune. Elles se déroulent au second semestre pour les élèves de première année à raison de deux leçons par semaine, et au premier semestre pour ceux de deuxième année, avec trois leçons par semaine.⁵ Au niveau de l'évaluation des connaissances, on retrouve la physique dans l'évaluation continue — où elle a le même coefficient que les matières reines d'analyse et de mécanique : 10 — et aux examens annuels, où son coefficient diffère légèrement — 15, contre 17 pour les deux matières citées précédemment.⁶

Lors du concours d'entrée cependant, la physique est notée de façon bien moins importante. Pour les épreuves orales le coefficient de physique et chimie (évaluées conjointement) est de 15, contre 29 pour chacune des deux épreuves de Mathématiques. Avec un coefficient de

4. École Polytechnique 1884, École Polytechnique 1929. Jules Jamin fut le premier titulaire de la chaire de physique n° 2. Cabart-Danneville n'officia qu'une année en tant que suppléant.

5. École Polytechnique 1874, p. 87.

6. École Polytechnique 1889.

3 à l'écrit, la physique-chimie possède encore un coefficient plus faible que les mathématiques (4), que le Français (6) ou l'Allemand (5). Cette différence de traitement peut s'expliquer par les connaissances exigées au concours en physique, relativement basiques ; nous y reviendrons pour le cas de l'électricité et du magnétisme.⁷

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les enseignants sont en grande majorité des anciens élèves de l'École. Nous détaillerons ici les travaux de ceux qui nous intéressent en particulier, à commencer par Émile Verdet (1824-1866), qui constitue une exception puisqu'il est un ancien élève de l'École Normale Supérieure. Maître de conférence à l'École Normale Supérieure, professeur à Polytechnique et titulaire de la chaire de physique mathématique à la Sorbonne, Verdet a eu une influence considérable dans la diffusion des travaux de scientifiques étrangers en France.⁸ À partir de 1852, il publie notamment une revue des travaux étrangers au sein des *Annales de chimie et de physique*. Cette influence est également saluée par ses pairs, à l'image d'Auguste De la Rive, qui écrit dans la préface des *Oeuvres de Verdet* :⁹

Verdet a réussi ainsi à tenir les lecteurs français au courant de toutes les découvertes et recherches les plus importantes qui se faisaient en Allemagne et en Angleterre (...) MM. Plücker, Thomson, Clausius, Joule, Helmholtz, Kirchhoff, et bien d'autres, ont eu en lui un interprète qui a contribué pour sa bonne part à leur assurer le rang qu'ils occupent dans le monde savant.

Parmi les journaux étrangers que Verdet suit régulièrement, on retrouve le *Philosophical Magazine*, dans lequel Maxwell a publié ses mémoires de 1861-62 sur le modèle mécanique de l'éther. Il n'y a cependant aucune trace des travaux du britannique dans les comptes-rendus de Verdet. Dans sa thèse sur « La réception en France des théories de Maxwell concernant l'électricité et le magnétisme »,¹⁰ Paulo Coelho Abrantès insiste sur le fait que Verdet a lu, au moins superficiellement, le mémoire de Maxwell dont il est question puisqu'il publie un compte-rendu sur un article de William Grove paru dans le vingtième volume du *Philosophical Magazine*. Cet argument est toutefois à nuancer, puisque l'article de Grove en question a été publié dans le volume précédent celui contenant le mémoire de Maxwell.¹¹ Nous serons donc

7. École Polytechnique 1887.

8. Verdet publiera également les *Oeuvres complètes* de Fresnel en collaboration avec son prédécesseur comme professeur de physique à l'X Henri de Sénarmont (voir Fresnel 1866).

9. Tiré de Abrantès 1985, p. 11. Voir aussi Verdet 1872. Nous avons déjà mentionné les principaux travaux de Thomson, Kirchhoff et Helmholtz. James P. Joule et Rudolf, respectivement britannique et prussien, sont restés célèbres pour leurs travaux en thermodynamique. Julius Plücker, allemand, a travaillé sur la spectroscopie.

10. Coelho Abrantès 1985.

11. Il s'agit probablement du mémoire « On the transmission of electrolysis across glass », voir Grove 1860.

moins catégoriques que l'auteur cité lorsqu'il avance « qu'il ne peut pas y avoir de doute », mais nous maintiendrons l'idée de forte probabilité pour que Verdet ait effectivement lu le mémoire de Maxwell dès sa parution en 1861/62. De façon plus certaine, Verdet l'a vu peu de temps après, puisqu'en 1863, il fait référence au mémoire de Maxwell dans ses *Recherches sur les propriétés optiques développées dans les corps transparents sous l'action du magnétisme*.¹² Celui qui sera son successeur comme titulaire de la chaire de physique n° 1 à l'X, Alfred Cornu (1841-1902), entre à Polytechnique en 1860, puis intègre l'École des Mines. Admis à l'Académie des Sciences de Paris en 1878, il reçoit également la prestigieuse médaille Rumford de la Royal Society de Londres pour ses travaux sur la mesure de la vitesse de la lumière. Ancien élève de Fizeau, Cornu reprend les expériences de son mentor avec le miroir tournant et avec la roue dentée.¹³

Le premier titulaire de la seconde chaire de physique créée en 1852, Jules Jamin (1818-1886), est également un ancien élève de l'École Normale Supérieure. Il est resté célèbre pour ses travaux en optique, en particulier pour la création de l'interféromètre éponyme. Il obtient lui aussi la médaille Rumford en 1858 en récompense de ses travaux sur la lumière. Enseignant à la faculté des sciences de Paris à partir de 1863, il prend la direction du laboratoire de recherche de physique de cette même faculté en 1868. En 1881, Alfred Potier lui succède comme professeur à Polytechnique. Comme Cornu, Potier est un ancien élève de Polytechnique passé par l'École des Mines. André Blondel (X 1883), qui a eu Potier comme professeur lors de son passage à Polytechnique, considère que celui-ci « a été en France l'introducteur et le grand champion des théories de Maxwell ». ¹⁴ Pour appuyer ses propos, deux articles de Potier, publiés dans le *Journal de Physique* en 1873, font état des travaux de Faraday et Maxwell. Nous reviendrons sur ces articles dans l'étude des journaux. Enfin, Henri Becquerel (1852 - 1908) est le dernier à occuper cette chaire de physique au XIXe siècle. Issu d'une famille bien connue en physique,¹⁵ Henri Becquerel est un ancien élève de Polytechnique passé par l'École des Ponts et Chaussées. Il obtient en 1903 le prix Nobel de Physique « pour la découverte de la radioactivité spontanée », prix co-attribué aux époux Curie.¹⁶

12. Voir Verdet 1872, p. 266-7.

13. Walter 2000, p 107. Voir aussi : Blanc et Bogaert 2012.

14. Blondel 1912, p. XI.

15. Son grand-père Antoine-César (X 1806) fut membre de l'Académie des Sciences à partir de 1829 et professeur de physique au Muséum national d'histoire naturelle à partir de 1837. Son père Alexandre Edmond reprend le poste au Muséum national d'histoire naturelle à la mort d'Antoine-César, et occupe également la chaire de physique du Conservatoire des Arts et métiers à partir de 1852. Il est resté célèbre pour sa découverte de l'effet photo-voltaïque en 1839.

16. Pour les informations biographiques sur Jules Jamin voir : Base Léonore, dossier LH/1351/9. Les informations biographiques pour Cornu, Potier et Becquerel sont tirées de Walter 2000.

La bibliothèque de l'X

L'autre moyen pour les élèves de se renseigner sur les théories nouvelles pendant leur formation réside dans la bibliothèque de l'école et l'accès qu'elle offre aux revues de physique et d'électricité. En 1881, on trouve ainsi sur les rayonnages les revues britanniques comme le *Philosophical Magazine* (de 1844 à 1880) et certaines années du *Cambridge and Dublin Mathematical Journal* (de 1850 à 1854), ainsi que la grande revue allemande des *Wiedemann's Annalen* (de 1842 à 1880).¹⁷ Le fonds constitué comprend de nombreuses revues étrangères, mais aucune qui soit spécifique à l'électricité. Si le journal français *La Lumière Électrique* est encore bien jeune (1879) pour figurer dans la bibliothèque en 1881, son homologue anglais le journal *The Electrician* aurait pu s'y trouver. Parmi les principaux ouvrages sur l'électromagnétisme, les *Experimental Researches* de Faraday (1849 pour la réédition), les *Papers on Electricity and Magnetism* de W. Thomson (1872), ainsi que le *Treatise* de Maxwell (1873) sont accessibles aux élèves (en version originale).¹⁸

6.2 Contenu général des cours

L'enseignement est organisé sur les deux années, suivant un ordre choisi. Jusqu'en 1894, la première année est dédiée à la thermodynamique, l'électricité et le magnétisme. On trouve ainsi réparties : 11 leçons pour la thermodynamique (mélanges de gaz, échanges de travail et d'énergie, conductivité thermique), 2 leçons sur le magnétisme, 4 leçons sur l'électricité statique et l'action chimique des courants, 3 leçons sur l'électrocinétique et les piles, 4 leçons sur le potentiel électrique, 3 leçons sur l'électrodynamique des courants et 3 leçons sur l'induction. La deuxième année est organisée autour de « l'étude des vibrations », avec l'acoustique et l'optique. Les 10 premières leçons sont dédiées à l'acoustique, les 20 leçons d'optique se répartissent sur la définition des rayonnements (lumineux, chimiques, calorifiques), la réflexion et réfraction des ondes et les hypothèses sur la nature de la lumière, la diffraction, et la polarisation lumineuse.

Ce choix de programme répond à une « unité », comme Jamin le précise dans son introduction du cours de deuxième année :¹⁹

17. De 1842 à 1877 la revue s'intitule *Poggendorff Annalen* puis à partir de 1877 *Wiedemann's Annalen*.

18. École Polytechnique 1881.

19. Jamin 1873, p. 1.

Les cours de 1^{ère} année manquaient forcément d'unité. Les faits électriques ne sont pas rattachés à une théorie complète, car celle des deux fluides n'est qu'une suite d'hypothèses.

L'étude de la chaleur est plus avancée, et se ramène de plus en plus au principe de l'équivalence mécanique, mais si l'existence du mouvement moléculaire est démontrée, la nature est inconnue.

Le cours actuel a pour objet unique l'étude des vibrations, c'est-à-dire des mouvements moléculaires périodiques. Les vibrations se partagent en deux classes : les unes, assez lentes et d'une amplitude assez considérable pour pouvoir être rendues sensibles, produisent sur le tympan la sensation du son ; les autres, incomparablement plus rapides et plus petites, communiquent à l'organe de l'œil la sensation de la lumière. Les premières sont propagées par tous les milieux pondérables ; la transmission des secondes ne peut être attribuée qu'à un fluide hypothétique, l'éther.

Jamin résume ainsi le programme des cours des deux années d'étude, en justifiant également cette répartition. Les cours de première année, avec l'électricité et la thermodynamique, peuvent être rassemblés en se rappelant que certaines théories de la chaleur se basent sur le mouvement d'un fluide, de la même façon que la théorie dominante de l'électricité est celle des deux fluides, que nous développerons plus loin. Mais ces théories sont incomplètes, ou simplement « hypothétiques ». Les cours de deuxième année sont regroupés sous le terme générique d' « étude des vibrations » : l'acoustique, abordant l'étude des ondes sonores, et l'optique. On notera d'ailleurs que pour ce dernier domaine Jamin fait référence explicitement à la perception des ondes lumineuses par l'œil, mais les domaines infrarouges sont également abordés dans les différents cours d'optique.

Ce programme reste sensiblement le même jusqu'en 1894, ce qui est principalement dû au fait que les programmes d'enseignement ne sont ré-évalués que tous les dix ans. Cette année-là voit un changement majeur, puisque le conseil d'instruction émet « différentes propositions à titre d'essai, pour l'année 1894-95 », parmi lesquelles une inversion du programme de première et de deuxième année. À partir de la rentrée suivante, l'acoustique et l'optique sont donc faits en première année et la thermodynamique et l'électro-magnétisme sont abordés en deuxième année.²⁰

Aucune raison n'est donnée pour justifier ces « propositions d'essai ». On peut formuler

20. Ecole Polytechnique 1894 (b), p. 358. En pratique, pour l'année 1894-95, Cornu, en charge du cours de deuxième année, s'occupe de l'acoustique et de l'optique comme auparavant, mais Becquerel, qui a le cours de première année, fait le même programme d'optique et acoustique, à quelques exceptions près.

deux hypothèses pour les expliquer. La première concerne le nouvel arrivant : l'année 1894-1895, qui correspond à la modification de programme, est la première année d'enseignement de Becquerel au sein de l'école. S'il est difficile de ne pas y voir de relation, et que Becquerel était présent au conseil d'instruction en tant que professeur, il semble peu probable qu'il ait choisi de modifier radicalement les programmes avant même son entrée officielle en fonction (Becquerel ne sera officiellement nommé par le conseil de perfectionnement qu'en janvier 1895). L'autre hypothèse, plus probable, est la révision décennale des programmes d'enseignement, qui tombe justement en 1894. Dans une période où les avancées techniques et théoriques se multiplient, en particulier en électro-magnétisme, il est possible que l'école ait choisi de modifier son approche qui accordait jusqu'alors à l'optique la place de science reine en physique.

Électrostatique et magnétisme chez Potier

Les cours sur l'électricité et le magnétisme de Polytechnique se basent avant tout sur le formalisme mathématique, et ne font que peu appel à d'autres notions ou des concepts plus matériels, comme on en trouve dans les premières théories électriques avec les atmosphères ou les molécules d'électricité. Cependant on trouve encore une théorie basée sur des concepts matériels : il s'agit de la théorie des deux fluides — électriques ou magnétiques — et celle du fluide unique électrique. Ces théories sont présentées dans les cours comme étant celles qui ont permis d'expliquer les différents phénomènes d'électricité statique observés lors des premières expériences historiques. Bien que cela ne soit pas précisé dans les cours de Polytechnique, elles prennent une place importante dans l'histoire des modèles d'éther car, comme le souligne Poincaré dans son cours *Électricité et Optique*, la théorie du fluide unique est celle « à laquelle se rattache la théorie de Maxwell ». ²¹

Les expériences mentionnées sont notamment les attractions et répulsions obtenues en frottant un bâton de verre, de la résine, etc., et les phénomènes magnétiques avec l'existence de deux pôles aux effets opposés. On retrouve cette description dans le cours de première année donné par Potier. Pour la partie sur le magnétisme, Potier commence par donner la définition d'un aimant ainsi que leurs propriétés en définissant les pôles Nord et Sud, puis l'explication proposée par Coulomb faisant intervenir deux fluides, aux actions opposées. D'après Coulomb, « ces deux fluides sont mélangés dans les corps, mais peuvent parfois être plus concentrés d'un côté que de l'autre ». D'autre part, pour justifier l'existence d'aimants

21. Poincaré 1890, p. 1. Voir 11.2.

permanents, Coulomb fait intervenir une force coercitive qui garde les deux fluides séparés dans certains matériaux. La formule obtenue par Coulomb est détaillée dans un paragraphe sur la « proportionnalité de la force au produit des masses », et Potier explique que « c'est par analogie avec la loi de l'attraction universelle que Coulomb a conçu sous la forme $m.m'f(r)$ la loi des attractions et répulsions magnétiques », en postulant que la force était proportionnelle aux masses de fluide impliquées. Il souligne toutefois que « ces fluides n'existent pas », et poursuit son raisonnement en insistant sur le fait que l'utilisation des fluides reste une hypothèse, et que la relation entre la force et les quantités m et m' doit être démontrée, ce qu'il fait par la suite. Après avoir montré que la déviation d'un aimant par un autre était constante, Potier conclut d'ailleurs :²²

Par conséquent, tout se passe comme si la répulsion de deux masses magnétiques, m, m' , était $C_x mm'/r^2$, les masses m et m' étant affectées du signe + quand il s'agit du fluide positif, du signe – quand il s'agit du fluide négatif; l'action terrestre sur une masse m a une composante horizontale mH dirigée vers le nord

où la quantité H est définie comme « la composante horizontale de l'action terrestre sur l'unité [arbitraire] de quantité de ce fluide », et le coefficient C_x n'est pas défini.²³

L'hypothèse des deux fluides en magnétisme est donc surtout enseignée comme l'hypothèse de travail historique de Coulomb. Potier met néanmoins rapidement en avant que ces fluides sont imaginaires, et n'en garde que la formule de Coulomb. Un peu plus loin dans le cours, on trouve énoncée de manière claire la méthodologie et les outils pour l'étude du magnétisme. Après avoir remarqué qu'un aimant coupé en deux parties donnait deux aimants distincts, Potier pointe une contradiction avec l'hypothèse des deux fluides :²⁴

Dans tout fragment d'aimant, on aura toujours autant de fluide + que de fluide –, et l'on ne peut plus admettre l'existence des fluides, existant l'un dans une moitié, l'autre dans l'autre moitié d'un aimant.

avant de conclure :²⁵

22. Potier 1887, p. 141-2.

23. *Ibid.*

24. *Ibid.*, p. 170-1.

25. *Ibid.*

Aujourd'hui l'idée du fluide magnétique est généralement abandonnée ; on ne conserve que les notions de pôle, de quantité de magnétisme, que comme des abstractions destinées à rendre les calculs plus faciles, on suppose que les corps magnétiques sont formés de molécules magnétiques ayant individuellement les propriétés des aimants, c'est-à-dire un axe magnétique et un moment magnétique.

Les « fluides magnétiques » sont rapidement mis en défaut, notamment par le fait que les aimants peuvent être subdivisés. Cette propriété empêche tout transfert de fluide, et tout excès (ou défaut). Ils sont par conséquent rapidement remplacés par les formulations plus mathématiques, même si certains éléments de langage restent dans le vocabulaire du magnétisme. On notera pour compléter la remarque de Potier que beaucoup d'articles et de comptes rendus contemporains utilisent le terme de « masses magnétiques », qui découle de l'hypothèse des deux fluides.

Qu'en est-il maintenant de l'approche des fluides électriques ? Peut-on leur attribuer un rôle semblable dans la construction des théories enseignées ? Potier commence par décrire les phénomènes connus d'électrostatique, comme l'attraction ou la répulsion de laine de verre ou de résine frottées. D'après lui, la première hypothèse inventée fut l'hypothèse des deux fluides, « imaginée pour relier tous ces faits », et nommés ainsi car leurs effets sont opposés. La loi des attractions et répulsions est d'ailleurs attribuée à Coulomb qui « a trouvé les lois des attractions et répulsions de ces fluides hypothétiques en employant les mêmes moyens que pour l'étude des attractions et répulsions magnétiques ». La relation de proportionnalité entre l'action et la quantité de fluide est justifiée de façon *ad hoc* de la même façon qu'en magnétisme, et pour Potier : « Coulomb a montré que les choses se passent *comme si* ces fluides avaient une existence réelle ». D'autre part, si Potier n'aborde pas très explicitement la théorie du fluide unique, il souligne que l'ajout d'un des deux fluide revient à soustraire une quantité égale de l'autre, et pour lui « on supposera donc toujours que l'on parle d'électricité positive, le signe des quantités entrant dans les formules indiquera la nature de l'électrisation ». ²⁶ On peut remarquer ici que Potier ne mentionne que le travail de Coulomb par rapport à l'hypothèse des deux fluides. Il ne parle pas de Charles Dufay, qui a pourtant introduit l'idée des deux électricités, ni ne parle de Benjamin Franklin pour la théorie de l'électricité unique (voir chap. 1).

La question des mouvements des fluides ne s'était pas posée pour le magnétisme, mais elle est plus présente pour l'électricité. Potier l'aborde dans une partie sur la résistance des gaz et des matériaux. Pour ce qui est des matériaux conducteurs, la répartition des charges en

26. *Ibid.*, p. 182-3. Potier souligne, les italiques sont nôtres.

surface amène à penser que les fluides peuvent se mouvoir à l'intérieur du conducteur. Dans les gaz, le phénomène d'étincelle entre deux sphères chargées est expliqué par le mouvement des fluides, qui peuvent se déplacer à travers l'isolant, bien que ce soit en faibles quantités. Dans le raisonnement sur la polarisation des diélectriques, il n'est question que de masses de fluides mises en jeu. Potier va d'ailleurs plus loin et souligne que « la résistance opposée au passage diminue avec la pression jusqu'à une certaine limite, pour augmenter ensuite et devenir absolue quand le vide est atteint ». Par conséquent, si le vide est un isolant parfait les fluides électriques ne peuvent s'y mouvoir. Notons que Potier emploie le terme de « vide » sans réellement le définir pour les phénomènes électriques. Il ressort de son utilisation que c'est un espace qui ne contient pas de matière ordinaire, mais aucune information n'est donnée sur la présence d'un autre élément. Dans le cadre de l'optique, Potier précisera la présence de l'éther (voir plus loin page 174).²⁷

Au niveau du formalisme mathématique, Potier définit le potentiel électrique sans avoir mentionné ni même défini la force électrique (il définit le potentiel à partir du travail). C'est le potentiel qui est utilisé pour effectuer les calculs dans toute cette partie sur l'électrostatique. La comparaison avec le magnétisme permet de montrer de grandes différences entre les deux approches. Avec le magnétisme, les fluides représentaient une hypothèse de travail qui était vite mise en défaut, et qui était remplacée par l'utilisation des moments magnétiques. Pour ce qui est des fluides électriques, et bien que Potier les considère comme irréels, les explications de différents phénomènes de conduction sont faites en utilisant cette hypothèse ; ces fluides peuvent se déplacer à travers les conducteurs, ainsi que dans les isolants mais pas dans le « vide ». Cependant, à part ces différences entre les fluides, l'expression des forces est similaire dans les deux domaines. Potier résume :²⁸

Les forces magnétiques ou électriques peuvent toujours se ramener à des forces émanant de centres hypothétiques, et variant en raison inverse des carrés des distances ; il y a donc des lois communes à toutes ces actions (et aussi à la gravitation universelle). L'existence d'un potentiel, de surfaces de niveau auxquelles la force exercée sur l'unité de masse est normale, et le théorème qui donne la somme algébriques des masses agissantes contenues dans l'intérieur d'une surface fermée = $-\frac{1}{4\pi} \sum \frac{dV}{dn} d\sigma$ sont de ce nombre.

Si l'approche phénoménologique permet dans les deux cas de justifier la théorie des deux

27. *Ibid.*, p. 188-9.

28. *Ibid.*, p. 229-30. Potier souligne. Le théorème dont Potier donne ici une formulation est ce qui est utilisé aujourd'hui comme le théorème de Gauss pour l'électrostatique.

fluides, et du fluide unique pour l'électrostatique, on constate que l'usage de ces hypothèses est bien différent entre magnétisme et électrostatique. D'autre part, au niveau du formalisme mathématique on a l'introduction, assez rapidement, de la « force de champ magnétique » alors que l'électrostatique utilise le potentiel plutôt que la force électrique. Le potentiel vecteur magnétique n'est pas utilisé.

Grandeurs électriques, actions des courants et induction

La définition des grandeurs en électricité est faite à partir de l'étude de piles. On y retrouve les différents concepts abordés en magnétisme et en électrostatique, utilisés ici pour définir le courant électrique :²⁹

On appelle pôle positif d'une pile l'origine du conducteur qui est au potentiel le plus élevé, l'autre est le pôle négatif. Lorsqu'on réunit par un conducteur continu les deux pôles de la pile, ce conducteur s'échauffe ; il acquiert des propriétés magnétiques particulières, si une partie de ce conducteur est liquide, il devient le siège de réactions chimiques. On dit alors que le conducteur est parcouru par un courant électrique ; on suppose que le potentiel étant différent aux deux extrémités de ce conducteur, l'électricité n'y peut être en équilibre. Dans la théorie des deux fluides, on dira que l'électricité positive est poussée vers le pôle négatif, et l'électricité négative dans l'autre sens, et on se représente le circuit comme parcouru par un courant d'électricité positive dans un sens, et un courant d'électricité négative en sens inverse. [...] Mais comme on l'a déjà expliqué pour la décharge on peut aussi bien dire que l'électricité + seule est en mouvement et c'est dans ce sens qu'on prendra les mots de sens du mouvement et quantité d'électricité mise en jeu [...].

Les courants sont donc définis comme le passage d'une quantité « d'électricité » d'un point à un autre. La définition de l'électricité dans ce cas pose d'ailleurs un problème, et Potier doit recourir à la théorie des fluides pour expliquer le mouvement de cette entité. Dans le cas d'une décharge pour un condensateur, ce passage est rapide et court. À l'inverse, pour une pile, le passage du courant est constant à l'extérieur de la pile car les pôles sont maintenus à des potentiels constants. Rappelons qu'à l'époque de ce cours de Potier, l'existence de l'électron comme particule support de l'électricité n'est ni démontrée ni même supposée. Par contre, l'existence de « courants » à l'intérieur du condensateur (milieu diélectrique) est une

29. *Ibid.*, p. 245-6.

hypothèse de Maxwell, que Potier connaît bien. Le fait qu'il décrive les décharges au sein du condensateur comme « rapides » n'est pas anodin, dans les articles qu'il fait sur Maxwell il caractérise de même les courants de déplacement (voir 9.1 page 266).

Potier aborde ensuite le domaine de l'électrodynamique, et du lien entre courants et magnétisme. Il commence par décrire l'expérience d'Ersted et la règle du « bonhomme d'Ampère ». ³⁰ « L'intensité électromagnétique du courant » est alors une grandeur définie par ses effets magnétiques, en l'occurrence son action sur un pôle magnétique : l'intensité est proportionnelle au travail reçu par le pôle. Il donne également la loi d'action des courants sur les courants (formule d'Ampère) et décrit le champ magnétique de systèmes usuels : feuillet magnétique, bobine... , puis pose l'action d'un aimant sur les courants, en invoquant le principe des actions réciproques (puisque un courant agit sur un aimant). L'exemple d'application donné par Potier pour illustrer le couple exercé par un aimant est le dispositif de la roue de Barlow. ³¹

La partie sur l'induction constitue la dernière partie du cours chez Potier, elle est intégrée à la partie sur les circuits électriques, qui regroupe les lois sur les courants, et vient après l'étude des actions chimiques et calorifiques. L'auteur commence par expliquer la contribution de Faraday et ses découvertes dans ce domaine, en détaillant plusieurs de ces expériences. Le tout premier paragraphe résume en quelques lignes la théorie de Faraday concernant la propagation de l'action électrique. Potier explique : ³²

Les phénomènes d'induction électro magnétique ont été découverts par Faraday en 1832. Considérant que les courants développent le magnétisme dans l'acier, il pensa qu'on devrait rechercher si les aimants pouvaient développer des courants. Faraday croyait d'ailleurs qu'il n'existe pas d'actions à distance ; pour lui le champ magnétique est occupé par un milieu, qu'il ne définit pas autrement, mais qui est

30. La « règle du bonhomme d'Ampère », toujours utilisée dans l'enseignement de nos jours, énonce que pour un bonhomme placé le long d'un fil électrique tel que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête, et qui regarde le point considéré, alors la force magnétique au point regardé est indiquée par la direction du bras gauche (tendu sur le côté). Cette règle est une traduction ludique du rapport rotationnel direct entre champ et courant. Une autre image est celle du « tire-bouchon de Maxwell », selon laquelle lorsque la pointe du tire-bouchon indique le sens du courant, le sens de la force magnétique est celui dans lequel on doit « visser » le tire-bouchon.

31. *Ibid.*, p. 250-85. Pour des précisions sur le dispositif de la roue de Barlow voir 12.1 page 401.

32. *Ibid.*, p. 382.

modifié par la présence des aimants, et ce serait ce milieu qui exercerait sur les aimants et les courants les forces dont on a étudié la grandeur et la direction ; les aimants et les courants n'agissent pas directement les uns sur les autres mais par l'intermédiaire de ce milieu qui transmet leurs actions, comme les fluides transmettent les pressions.

En présentant les idées de Faraday, Potier mentionne un milieu intermédiaire qui exerce les actions de proche en proche. Cette vision des idées du britannique n'est pas tout à fait exacte, puisque Faraday utilisait avant tout l'idée de lignes de force, et ne croyait pas en l'éther, ou un quelconque milieu. On peut supposer que Potier mélange ici les idées de Faraday et celles de Maxwell. L'évocation du milieu intermédiaire s'arrête d'ailleurs à ce paragraphe. En effet, dans la suite de son raisonnement Potier n'utilise que la notion de pôle et de potentiel. Dans un premier temps, il présente les différentes expériences de Faraday. On peut les résumer comme suit :

- Première expérience : mouvement d'un aimant à travers un enroulement de fil relié à un galvanomètre, apparition d'un courant lorsque l'aimant est en mouvement. Le signe du courant dépend du sens du mouvement.
- Deuxième expérience : Une première spirale de fil de cuivre, parcourue par un courant, est rapprochée d'une seconde spirale, reliée à un galvanomètre. Apparition d'un courant induit lorsqu'on rapproche les spirales, qui change de sens avec le courant inducteur.
- Troisième expérience : Similaire à la deuxième expérience, les deux spirales n'étant parcourues initialement par aucun courant. On « lance » un courant dans la première spirale, et on constate l'apparition d'un courant dans la seconde spirale.

Il continue en détaillant le montage utilisé par Faraday pour mettre en avant la création d'une force électromotrice dans un circuit. Dans cette expérience, Faraday construit un circuit avec deux branches en parallèle, l'une comportant une bobine et l'autre une simple résistance (formée de fils conducteurs). Un galvanomètre différentiel permet de mesurer les différences d'intensité dans les deux branches, et un interrupteur est placé sur la branche avec la bobine. Les explications de Potier et la démonstration pour arriver à l'expression de la force électromotrice sont alors établies dans un formalisme mathématique quasiment similaire à celui utilisé de nos jours, à savoir l'utilisation de la loi de Kirchhoff (loi des mailles) et l'établissement des équations avec les grandeurs comme la tension, l'intensité, les résistances, etc.

À l'exception du cours extrait ci-dessus sur Faraday, Potier n'évoque plus la question du milieu ou des lignes de force. Ces entités n'apparaissent pas dans le traitement des phénomènes magnétiques. Cette absence amène à se poser la question du rôle du milieu intermédiaire pour l'électromagnétisme.

La description des machines dans le cours de Becquerel

Avant d'aborder cette question de l'éther, nous allons évoquer un autre sujet proche de l'induction et des grandeurs électriques. Dans notre introduction, nous avons souligné le fait que les théories électromagnétiques de l'éther étaient finalement inutiles dans l'utilisation des appareils électriques. Nous allons discuter ce constat en prenant l'exemple des machines électromécaniques et l'enseignement qu'en fait Becquerel à la toute fin du siècle. Nous montrerons que les seules lois nécessaires sont celles enseignées aujourd'hui dans l'étude du magnétisme, sans nécessité d'une théorie particulière.

Dans son cours, Becquerel place l'étude des machines juste après les actions réciproques des courants, et celles des aimants sur les courants. Il commence par donner la loi de Laplace, exprimant la force magnétique créée par un élément de courant. En formalisme moderne, pour un élément de courant situé en O et créant une force en P :³³

$$d\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{i d\mathbf{l} \wedge \mathbf{OP}}{|\mathbf{OP}|^3}$$

Cette loi donne un comportement de la force magnétique en $1/r^2$, où r est la distance séparant les deux points considérés. Elle est aujourd'hui désignée comme la *loi de Biot et Savard* (qui ont réalisé les expériences permettant de montrer les différentes dépendances). Pour établir sa formule, Becquerel donne la définition habituelle de la force magnétique comme étant la force mécanique exercée sur une masse magnétique de valeur unitaire. À partir de cette formule, il donne également l'expression du travail résultant du déplacement d'un pôle magnétique, comme le produit de l'intensité par l'angle solide. Cette loi est maintenant connue comme la *loi d'Ampère* (mais formulée par Maxwell) et s'exprime :³⁴

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i_{\text{enlacé}}$$

Le terme de gauche est le travail total produit par le déplacement du pôle : le contour C est le trajet suivi par une masse magnétique de valeur unitaire, dans un champ où la force

33. Becquerel 1897, p. 221.

34. *Ibid.*, p. 226.

mécanique vaut \mathbf{H} . Le courant $i_{enlacé}$ désigne l'intensité traversant la surface délimitée par le contour C . La notion de champ magnétique apparaît régulièrement, pour désigner les forces créées en chaque point par un aimant ou un courant. De manière générale, Becquerel s'en sert pour évoquer la zone dans laquelle le déplacement d'un pôle va créer un travail.

Il reprend d'ailleurs la question du travail, pour traiter cette fois de la réciproque : un circuit électrique se déplaçant dans un champ magnétique créé par un aimant. En réutilisant l'expression de la force (principe d'égalité de l'action et de la réaction), Becquerel montre que le travail produit par le déplacement du circuit est $W = i\Delta\Phi$, où Φ est le flux de force magnétique à travers le circuit. Il utilise ici la notion de ligne de force, qui lui sert à orienter la force magnétique pour définir le signe de Φ . La dernière loi que démontre Becquerel est la loi d'action des courants, que nous avons évoquée dans le chapitre sur Ampère (voir 1.2 p. 48), donnant la force exercée par un élément de courant sur un autre :³⁵

$$d^2\mathbf{f} = -ii'\frac{\mathbf{r}}{r}\left[\frac{d\mathbf{l}\cdot d\mathbf{l}'}{r^2} - \frac{3(\mathbf{r}\cdot d\mathbf{l})(\mathbf{r}\cdot d\mathbf{l}')}{2r^4}\right]$$

Avec ces quatre lois, Becquerel définit le coefficient d'inductance propre d'un circuit et celui d'inductance mutuelle, puis aborde la question des moteurs électriques. Il débute cette partie en disant que « les moteurs électro-magnétiques sont fondés sur l'application des lois qui ont été exposées plus haut ». Il prend comme exemple la machine de Gramme (utilisée comme moteur). Il commence par décrire la structure de la machine, notamment l'induit, constitué d'un anneau de fer autour duquel s'enroule un fil conducteur. Ce fil est alimenté en courant continu via un collecteur (pièce métallique en contact avec les balais reliés au générateur). Cet ensemble, appelé « anneau » ou « rotor », est placé au sein d'un « stator » (aimant ou électroaimant fixe). Lorsque le courant circule dans l'induit, les forces magnétiques exercent un couple créant une rotation, transmise selon un axe (voir figure 6.2).

Dans la description quantitative de la machine, le seul calcul que fait Becquerel est celui du couple exercé sur le rotor, qu'il détermine en utilisant la formule du travail $W = i\Delta\Phi$. À titre de comparaison, les calculs enseignés de nos jours dans l'enseignement supérieur pour les premières approches de ces machines donnent non seulement le couple, mais également la vitesse de rotation en fonction de la tension aux bornes de l'induit, grandeur que Becquerel n'évoque à aucun moment. Cette absence a d'ailleurs une raison bien précise : tout le raisonnement que fait Becquerel se base sur les formules d'Ampère pour les courants et de Laplace (ou Biot et Savard) pour la force magnétique. Ces formules sont issues de théories d'action à distance, ce qui exclut presque naturellement le recours à des idées comme celles de Faraday.

35. *Ibid.*, p. 262.

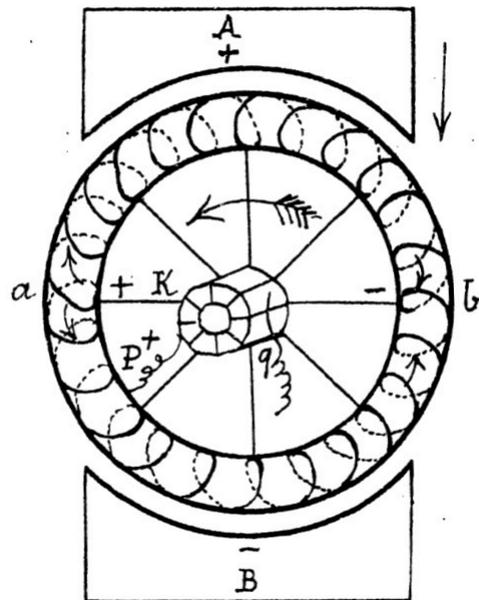


FIGURE 6.2 – Dessin de la machine de Gramme. L'aimant AB est le stator créant un champ fixe, l'anneau ab est l'induit, p et q les collecteurs (Becquerel 1897, p. 280.).

De plus, elles n'utilisent que l'intensité du courant et la masse magnétique d'un pôle comme seules grandeurs. Si la première reste utile en électrocinétique, la seconde est complètement inutile dès lors qu'il s'agit de décrire une machine complète, bien plus complexe qu'un simple pôle. Au final, la seule loi utilisée par Becquerel est d'ailleurs la loi du flux. La loi d'induction de Faraday, qui permet d'introduire la tension électrique comme grandeur « pratique » n'est jamais mentionnée.

Cette étude de cas permet de mettre en avant les points positifs d'une description « française » de l'électromagnétisme : en partant de lois élémentaires, tirées des théories d'action à distance, on arrive à déterminer des lois plus utiles en pratique et à justifier le fonctionnement de dispositifs complexes. Cependant cette approche présente de grosses lacunes car elle n'introduit pas certaines notions nécessaires (comme la tension électrique) et en présente d'autres qui sont inutiles (comme la masse magnétique). L'utilisation d'une théorie en particulier n'est pas nécessaire, et la question de l'éther ne se pose pas dans la description de ces machines. Elle est limitée aux domaines théoriques.

6.3 De l'éther optique à l'éther électromagnétique ?

Les cours d'optique et l'éther chez Jamin

L'éther en tant que milieu de propagation des rayonnements lumineux est connu des élèves, et régulièrement mentionné dans les leçons d'optique. Nous détaillons ici ces leçons, en commençant par les cours de Jamin. Dans l'introduction citée plus haut (voir page 161), Jamin oppose l'électricité, avec une théorie des deux fluides qui n'est qu' « une suite d'hypothèses » à celle de l'optique. Jamin sous-entend-il que la théorie optique est mieux fondée ? S'il ne le dit pas explicitement, nous pouvons le supposer aisément, car la théorie optique est alors largement acceptée. Néanmoins Jamin souligne que « la transmission des secondes ne peut être attribuée qu'à un fluide hypothétique, l'éther ». ³⁶

La distinction faite ici entre l'électricité et l'optique est particulièrement intéressante, notamment car elle va évoluer de façon significative. Cette introduction date de 1873, l'année même où Maxwell rédige son *Treatise*, il est donc normal de ne pas rapprocher de façon évidente optique et électricité, et encore moins de parler de théorie électromagnétique de la lumière. Cependant, si le programme des cours reste sensiblement le même, le contenu diffère selon les professeurs.

On trouve le programme du cours d'optique dans le « Programme des enseignements intérieurs » de l'école, avec un schéma qui reste similaire sur la période de 1874 à 1898 : la vingtaine de leçons portant sur l'optique peut être divisée en quatre parties à peu près égales. L'une porte sur « l'étude des radiations », comportant analyse spectrale, radiations lumineuses et thermiques, ainsi que les phénomènes de phosphorescence et de fluorescence. Une deuxième aborde les hypothèses sur la nature de la lumière, la vitesse de la lumière, ainsi que les phénomènes d'interférence. Une troisième traite des propriétés de la lumière polarisée, alors que la dernière étudie la double réfraction dans les cristaux (le terme « d'optique anisotrope » n'étant pas encore employé dans les programmes). ³⁷

Une certaine liberté d'enseignement étant laissée au titulaire des chaires de physique, ces parties sont abordées à des stades de l'année différents selon les professeurs. Pour Jamin, le cours d'optique débute directement par une explication des théories de la lumière, bien qu'elle soit très sommaire. Ainsi, commence-t-il par : ³⁸

36. Jamin 1873, p. 1.

37. Voir les programmes d'enseignement intérieur : École Polytechnique 1874, p. 54-55, École Polytechnique 1886, p. 14 et École Polytechnique 1898, p. 12-13.

38. Jamin 1873, p. 42.

Théorie de l'émission – D'après Newton la lumière est produite par des molécules très ténues lancées par chaque corps lumineux. Dans cette théorie deux lumières de natures différentes sont considérées comme dues à des molécules de diverses espèces.

Théorie des vibrations – Dans cette théorie la lumière est due à un mouvement particulier en vibration qui a [lieu] par l'intermédiaire d'un fluide hypothétique ou éther.

Par la suite, Jamin ne revient pas sur ce point : il n'aborde la question des deux théories qu'en traitant le problème de la réflexion et de la réfraction, et de leurs lois. Le reste de cette première partie porte sur la vitesse de la lumière, avec les calculs de Røemer, les expériences de Fizeau et de Foucault. Dans le reste du cours, Jamin traite des thèmes imposés par le programme, avec l'analyse spectrale, la polarisation et la double réfraction.

Le cours d'optique de Potier

L'approche très rudimentaire de Jamin concernant la partie du cours sur la nature de la lumière peut être confrontée à celle de son successeur, Alfred Potier. Dans le cours qu'il donne à Polytechnique de 1881 à 1895, Potier fait une place plus importante aux théories de la lumière, et prend le parti inverse de Jamin. Il commence par aborder l'optique géométrique : après la partie sur l'acoustique, la partie optique débute au paragraphe §86 par les lois de la réflexion et réfraction, ainsi que les mesures d'angles, puis avec les « actions chimiques et phosgéniques » (fluorescence et phosphorescence). À partir du §104 il aborde l'analyse spectrale, où il associe les « radiations calorifiques » aux « radiations lumineuses », en étudiant la contribution du spectre infra-rouge. Après une partie sur la vitesse de la lumière, reprenant les expériences déjà mentionnées par Jamin, la partie intitulée « Théorie de l'émission — Théorie des ondulations » débute au §115 par un passage en forme de justification pour l'introduction de ces théories :³⁹

Nous avons établi l'identité de la lumière et de la chaleur rayonnante. Celle-ci se transforme par absorption, et élève la température des corps qui l'absorbent, en augmentant leur énergie. Si donc le principe de la conservation de l'énergie est exact, et s'étend à tous les phénomènes naturels, la lumière est une des formes de l'énergie.

39. Potier 1887, p. 171.

Nous ne pouvons comprendre cette énergie sans support, et comme résidant dans le néant ; deux hypothèses ont été faites sur la manière dont cette énergie peut se propager dans l'espace.

Cette approche révèle l'intérêt pédagogique d'aborder la question de la nature de la lumière à la fin du cours : le lien entre les radiations calorifiques et lumineuses a déjà été fait lors de l'étude des spectres. On en déduit que la lumière est une forme de l'énergie, ce qui justifie l'introduction d'un milieu vecteur. Potier continue en résumant les deux théories, de façon plus détaillée que son prédécesseur :⁴⁰

Hypothèse de l'émission adoptée par Newton, et dont le dernier défenseur (première partie de ce siècle) a été Biot. Les sources lumineuses projettent des corpuscules ténus dans toutes les directions, les rayons lumineux sont les trajectoires de ces corpuscules, assez fins pour circuler à travers les molécules de corps transparents, mais arrêtés par le tissu plus serré des corps opaques ; l'individualité des radiations d'indices différents nous obligerait aujourd'hui à admettre autant d'espèces de corpuscules que de rayons.

Hypothèses des ondulations, soutenue notamment par Descartes, Huyghens, Young, et enfin par Fresnel, dont les travaux l'ont fait triompher définitivement. Tout l'espace est occupé par une substance à laquelle on a donné le nom d'éther ; aussi bien ce que nous appelons le vide que les corps transparents ou opaques ; dans ceux-ci toutefois les propriétés de l'éther paraissent modifiées, soit qu'il est condensé autour des particules pondérables ; soit que celles-ci participent à ses mouvements. Une source lumineuse est pour l'éther dans cette théorie, ce qu'est un corps sonore pour l'air, c'est-à-dire l'origine **d'ondes** qui propagent un mouvement **vibratoire et périodique**. Nous attribuerons à l'éther une masse et une élasticité.

Outre une explication un peu plus détaillée des deux théories que celle trouvée chez Jamain, on peut relever deux points importants dans les propos de Potier. D'une part, il y mentionne les « propriétés de l'éther », notamment lorsque celui-ci est à l'intérieur des corps, ce qui met en avant le problème du lien entre l'éther et la matière (en lien avec le coefficient d'entraînement partiel de l'éther). Parmi ces propriétés, l'omniprésence de l'éther entraîne naturellement une difficulté à définir ce « vide » que Potier évoque. D'autre part, on retrouve

40. *Ibid.*, les accentuations sont de Potier. Les différents auteurs mentionnés par Potier sont dans l'ordre : Isaac Newton, 1642-1727 ; Jean-Baptiste Biot, 1774-1862 ; René Descartes, 1596-1650 ; Christian Huyghens, 1629-1695 ; Thomas Young, 1773-1829 et Augustin Fresnel, 1788-1827. Ce dernier a notamment introduit l'idée d'entraînement partiel de l'éther (voir page 179).

l'analogie entre la propagation du son dans l'air et celle de la lumière dans l'éther, comme chez Jamin, ce qui justifie le choix de garder dans une même année les cours d'acoustique et d'optique, domaines que l'on peut regrouper sous la bannière de « physique des ondes ».

Cette comparaison entre acoustique et optique apparaît à plusieurs reprises dans la suite du cours. Ainsi, lorsque Potier aborde les lois de la réfraction et de la propagation d'une onde, il donne une vision mécaniste de l'éther où sont assignés des mouvements (position, vitesse) à des particules d'éther :⁴¹

De même que les vibrations d'un corps sonore se propagent dans l'atmosphère, nous supposons que les ébranlements, les perturbations apportées en un point à l'état d'équilibre de l'éther, se propagent à travers celui-ci avec une vitesse déterminée, de telle sorte que tous les points situés à une même distance du centre d'ébranlement se trouvent en même temps, à recevoir les mêmes mouvements.

Un peu plus loin, dans un paragraphe portant sur les « objections à la théorie des ondu-lations », Potier énonce que l'indice optique (défini comme le rapport des vitesses dans le vide et dans le milieu) diffère selon la couleur, pour un milieu donné, et en déduit que la vitesse de propagation de la lumière dépend de la période τ . Il utilise à nouveau la comparaison avec l'acoustique, en faisant l'analogie avec la propagation le long d'une corde. Il constate que la vitesse d'une onde dans une corde ne dépend de la fréquence que dans le cas où le milieu (ici la corde) n'est plus homogène. Cherchant à donner une explication théorique à la dispersion optique, il continue :⁴²

Si, par exemple, dans un milieu pondérable les propriétés de l'éther, le milieu qui propage spécialement la lumière, sont modifiées par la présence des molécules matérielles, que la distance de celles-ci ne soit pas négligeable par rapport aux longueurs d'onde des vibrations lumineuses, la vitesse de propagation des ondes ne sera plus indépendante de la période ; et cette influence négligeable en acoustique, à cause de la grandeur des λ peut cesser de l'être en optique.

L'analogie entre optique et acoustique rentre donc constamment en jeu dans les démonstrations et les interprétations des lois. Si le principe de raisonnement basé sur les surfaces d'onde est appliqué dans les deux cas, Potier détaille tout de même certaines limites de la

41. Potier 1887, p. 174 § 117, les italiques sont nôtres.

42. Potier 1887, p. 198 § 130. Sur la dispersion optique voir : Darrigol 2000, p. 320.

comparaison. D'une part, il attribue à l'éther « une masse et une élasticité », ce qui implique un raisonnement sur un éther solide, alors que la propagation du son se fait dans un fluide (avec des ondes purement longitudinales). D'autre part, les ordres de grandeur des quantités fondamentales diffèrent totalement, par exemple pour la longueur d'onde. Cette différence a des conséquences importantes sur la façon de considérer le milieu de propagation : alors que celui-ci peut être considéré comme homogène en première approximation pour une onde sonore, il ne peut pas l'être pour une onde lumineuse de par la présence des molécules de la matière.

Concernant le deuxième point abordé par Potier dans l'introduction, à savoir le lien entre l'éther et la matière ordinaire, les explications sont beaucoup moins fréquentes, et ne rentrent manifestement pas dans le cadre du cours. Potier n'en parle qu'à une seule reprise, dans un paragraphe portant sur « l'entraînement des ondes par la matière pondérable », dans lequel il aborde l'expérience de Fizeau et donne le coefficient d'entraînement partiel de l'éther. Il n'aborde le problème du lien entre éther et matière qu'au début, en soulignant que c'est « une question très importante au point de vue des relations entre la matière pondérable et l'éther ». Il est important de garder à l'esprit que lorsque Potier donne son cours à Polytechnique, il rédige des articles à propos de la théorie de Maxwell, et participe à la traduction du *Traité* ; les remarques sur la modification locale des propriétés de l'éther due à la présence de molécules matérielles s'inscrivent dans un raisonnement typiquement maxwellien. Pourtant il n'en fait aucune mention dans ses cours. Il n'évoque pas non plus l'expérience de Michelson de 1881, qu'il connaît bien puisqu'il a lui-même apporté une correction aux calculs de Michelson (en tenant compte du temps de propagation sur la branche transversale, voir page 110).

En comparant les cours de Jamin et de Potier on passe d'un cours d'optique n'abordant que les questions « pratiques » d'optique, concernant l'optique géométrique, la polarisation ou la double réfraction, à un cours qui propose également une partie plutôt développée sur la théorie de la lumière. Il apporte en outre des précisions sur le rôle de l'éther, bien que celui-ci soit cantonné à un rôle de milieu de propagation — similaire à l'air pour le son — et qu'on ne se pose pas en détail la question de sa nature. Avec le troisième enseignant, Henri Becquerel, on franchit un palier supplémentaire dans les explications apportées sur l'éther.

Le cours d'optique de Becquerel

Becquerel reprend le cours de physique à partir de l'année 1894-1895. Rappelons qu'à partir de cette année là, les programmes ont été inversés et que le cours d'optique est dé-

sormais fait en première année. De manière générale on constate une importance croissante donnée aux expériences et aux théories les plus récentes au sein du cours. Cela se retrouve au début de la partie « Optique », qui est un historique des expériences sur la mesure de la vitesse de la lumière, où l'on retrouve l'expérience de Foucault avec la roue dentée, reprise par l'astronome américain Simon Newcomb en 1882 alors directeur du *Nautical Almanac Office*. Ces expériences sont d'ailleurs détaillées au sein du cours.⁴³

Après une partie sur l'analyse spectrale et la phosphorescence, Becquerel aborde la partie sur les théories de la lumière.⁴⁴ Par rapport à ses prédécesseurs, il se montre beaucoup plus disert sur l'histoire des théories de la lumière, et mentionne entre autres Newton, Descartes, Huyghens, Biot et Fresnel ; mais également François Arago, ou Léon Foucault, qui n'étaient pas souvent mentionnés dans l'historique des travaux sur les théories de la lumière. L'autre nom important est celui de Maxwell, qui apparaît pour la première fois **en optique**, de même que sa théorie électromagnétique de la lumière. Becquerel présente cette théorie comme équivalente à celle de Fresnel :⁴⁵

Dans ces vingt dernières années, Maxwell a été conduit à proposer une nouvelle théorie, dite théorie électromagnétique de la Lumière, qui ne diffère pas en principe de la théorie des ondulations qui conduit à des formules identiques à celles que Fresnel avait établies, et dont le caractère est d'identifier à des manifestations électriques les phénomènes périodiques qui constituent la Lumière. Nous ne pourrions aborder ces questions qu'à la fin du cours d'électricité.

Becquerel souligne le fait que l'étude de cette théorie ne peut se faire que dans le cadre du cours d'électricité, qui est maintenant réservé pour la seconde année d'étude. La théorie de Maxwell est cependant mentionnée pour la première fois dans le cours d'optique, tout en étant une théorie basée sur l'étude des phénomènes électriques.

Concernant le rôle de l'éther, Becquerel donne également plus de détails que Jamin et Potier. Dans le paragraphe traitant de la « Théorie des ondulations », il reprend la définition de l'éther, l'analogie avec le son dans l'air, mais précise que cette analogie présente des limites. Nous reprenons la première partie de ce paragraphe :⁴⁶

43. Becquerel donne comme référence bibliographique pour Newcomb les *Astronomical Papers* de 1885. Voir aussi Roseveare 1982.

44. Sur l'analyse spectrale nous ne pouvons qu'évoquer le fondateur de l'observatoire de Meudon, Jules Janssen. Voir Flammarion 1908. Henri Becquerel était (très) bien placé pour évoquer la phosphorescence, dont le précurseur n'était autre que... son propre père, Edmond Becquerel (voir page 246).

45. Becquerel 1896, p. 201-2.

46. Becquerel 1896, p. 204. Le soulignage et les majuscules sont de Becquerel. Les coefficients μ et λ auxquels

Pour se rendre compte de la propagation de la Lumière, on suppose tout l'espace occupé par une substance à laquelle on a donné le nom d'Éther. Cette substance pénétrerait tous les corps. Les phénomènes lumineux seraient dûs à des perturbations périodiques se propageant par ondes. Un corps lumineux serait par rapport à l'Éther ce qu'un corps sonore est dans l'air, c'est-à-dire l'origine d'ondes propageant des mouvements vibratoires périodiques. On attribue à l'Éther une masse et une élasticité. Il serait inexact de l'assimiler à un fluide, car on verra que les déplacements de l'Éther qui correspondraient à la lumière devraient être des déplacements transversaux, et qu'au point de vue optique, ce milieu ne paraît pas propager de vibrations longitudinales. Pour les fluides on a $\mu = 0$. Pour l'Éther on aurait $\lambda + 2\mu = 0$ (voir note).

Enfin, le dernier point sur lequel Becquerel insiste par rapport à ses prédécesseurs est celui du lien entre la matière et l'éther. Pas discuté chez Jamin, et simplement évoqué comme « très important » chez Potier, il bénéficie d'un paragraphe entier chez Becquerel. Ainsi on trouve le paragraphe « entraînement partiel des ondes lumineuses par la matière pondérable », dans lequel il commence par poser le problème de la vitesse de l'éther par rapport à la matière :⁴⁷

On peut se proposer de rechercher si le milieu qui transmet les ondes lumineuses, l'Éther, est lié à la matière pondérable, et si, lorsque la matière est en mouvement, la vitesse de translation a quelque influence sur la vitesse de propagation de la lumière.

Si l'éther était lié à la matière pondérable, la vitesse de la matière devrait s'ajouter ou se retrancher à la vitesse de la lumière, comme il arrive pour la propagation des ondes sonores dans l'air ; la vitesse du son est augmentée ou diminuée de celle du vent. Si les deux milieux sont indépendants la vitesse de la matière doit être sans influence sur celle de la lumière. Fresnel en étudiant certaines particularités du phénomène de l'aberration avait été conduit à admettre que l'entraînement des

sont fait référence sont les coefficients de Lamé utilisés en théorie des matériaux (vu par les étudiants dans des cours précédents). Une déformation à $\mu = 0$ correspond à une dilatation pure sans cisaillement, une déformation à $\lambda + 2\mu = 0$ correspond à un cisaillement pur sans changement de volume.

47. Becquerel 1896, p. 261.

ondes lumineuses par la matière pondérable devait être partiel, et que si l'on désigne par u la composante de la vitesse d'un corps transparent dans la direction de la propagation de la lumière par n l'indice de réfraction pour la longueur d'onde des radiations considérées, et par v la vitesse de la lumière dans le corps ; la vitesse de propagation des ondes entraînées au lieu d'être

$$v + u \quad \text{était} \quad v + u \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

la vitesse de propagation par rapport à la matière en mouvement étant

$$v - \frac{u}{n^2}$$

Dans la suite Becquerel explique en détail l'expérience de Fizeau qui a permis d'illustrer l'entraînement partiel de l'éther (voir Annexe n°3).

De l'étude des trois cours d'optique successifs donnés à Polytechnique entre 1874 et 1900, il ressort une nette progression en ce qui concerne l'enseignement des théories de la lumière. Elles sont très rapidement abordées chez Jamin, plus détaillées chez Potier, bien que ce dernier ne traite pas les expériences les plus récentes. À l'inverse, Becquerel prend le parti de discuter des notions plus récentes comme la théorie de Maxwell, ou la répétition par Michelson en 1879 de l'expérience du miroir tournant de Foucault (même si l'expérience connue comme celle de Michelson et Morley sur la détection du vent d'éther n'est pas mentionnée chez Becquerel non plus).⁴⁸

La théorie électromagnétique de la lumière : de Potier à Becquerel

La théorie électromagnétique de la lumière arrive à Polytechnique pour l'année 1893-94, lorsque Potier s'occupe du cours de deuxième année (il s'agit d'ailleurs de sa dernière année en tant qu'enseignant). Le cours de deuxième année abordant toujours l'acoustique et l'optique, cette nouvelle partie est ajoutée à la toute fin du cours d'optique. Elle est constituée de deux chapitres. Le premier, relativement court chez Potier, relate les expériences récentes sur les ondes électromagnétiques. Le second traite de la théorie en elle-même.

Lorsque Becquerel arrive en 1894-95, l'inversion des programmes de cours l'amène à déplacer la partie sur la théorie électromagnétique de la lumière en fin de deuxième année, après

48. Becquerel 1896, p. 140-5. Sur l'expérience du miroir tournant une controverse s'est tenue entre Fizeau et Foucault. Voir Annexe n° 3 pour des précisions.

avoir étudié les phénomènes électriques (comme il le signale à ses étudiants). Il reprend le cours de Potier, surtout le second chapitre portant sur la théorie, repris presque à l'identique (Becquerel mentionne d'ailleurs un cours fait « d'après un résumé de M. Potier »). Il complète le premier chapitre avec des expériences plus récentes. Dans la suite de l'étude nous nous baserons sur le cours de Becquerel. Plusieurs passages sont notamment révélateurs de la perception des idées de Maxwell à Polytechnique, en particulier sur le milieu intermédiaire.

Dans l'introduction de son premier chapitre, Becquerel donne les principales idées de Faraday et de Maxwell. Comme Potier précédemment, Becquerel avance que Faraday considérait l'action électrique comme résultant de la tension au sein d'un milieu, sans évoquer les lignes de force. Il présente le résultat de Maxwell, selon lequel la vitesse de propagation « dans le milieu qui transmet les actions électriques et électro-magnétiques » est égale au rapport des unités électrostatique et électromagnétique. En reconnaissant que les valeurs expérimentales obtenues pour ce rapport sont de plus en plus proche de la valeur de la vitesse de la lumière, Becquerel reprend l'inférence de Maxwell selon laquelle « on doit donc en conclure que l'éther de la théorie des ondulations est aussi le véhicule des actions électriques ». ⁴⁹ La suite du cours laisse planer un doute sur l'importance que Becquerel accorde aux travaux du Britannique. En effet, il nous dit : ⁵⁰

Maxwell a même été plus loin, il a émis l'opinion que toute perturbation de ce milieu était un phénomène électrique, et que la lumière n'était qu'un cas particulier de la propagation de perturbations alternatives de période excessivement courtes. L'optique ne serait qu'une section des phénomènes électriques dont l'étude embrasserait les perturbations périodiques ou permanentes du milieu éthéré.

Ces vues semblent se confirmer à mesure que les expériences s'accroissent. Dans les théories de Fresnel et de ses successeurs, l'éther est considéré comme doué d'inertie et d'élasticité et ne diffère de la matière pondérable que par l'incapacité à propager une vibration longitudinale. Une semblable représentation mécanique manque pour l'électricité.

Ce passage pose question sur ce que Becquerel appelle « une représentation mécanique de l'électricité ». On retrouve d'ailleurs une tournure presque identique à la toute fin de son cours : ⁵¹

49. Becquerel 1897, p. 493.

50. Becquerel 1897, p. 493-4.

51. Becquerel 1897, p. 568.

De ces rapprochements entre les phénomènes électriques et lumineux, il ne ressort aucune explication des uns ou des autres, tandis que la théorie des ondulations tend à donner une explication mécanique des phénomènes lumineux en admettant que l'énergie de l'Éther y existe sous des formes déjà connues.

Becquerel semble préférer la théorie des ondulations de Fresnel pour sa propension à représenter la propagation de la lumière comme un mouvement mécanique. Or, si le modèle de Maxwell n'apparaît pas dans son *Treatise*, il n'en explique pas moins la transmission d'électricité par un système complètement mécanique, et la répartition d'énergie sous formes cinétique et potentielle. Rappelons ici que Maxwell conçoit dans un premier temps son modèle autour de vortex fluides, mais qu'en introduisant les courants de déplacement, et donc le caractère élastique des cellules, il quitte l'hydrodynamique pour se rapprocher de la mécanique du solide (voir chap. 2).

Concernant les expériences en lien avec la propagation des ondes électriques, Becquerel dresse un historique intéressant. Il commence par les expériences mesurant la vitesse de propagation le long d'un fil électrique, avec celle de Charles Wheastone de 1834 comparant une décharge directe et celle obtenue avec un courant ayant parcouru un fil assez long,⁵² puis celle de Hippolyte Fizeau et Eugène Gounelle, qui utilisent le même principe de la roue dentée que pour l'expérience de mesure de la vitesse de la lumière. Après une description approfondie des expériences de Hertz, sur l'établissement d'ondes électromagnétiques stationnaires puis la propagation des ondes le long d'un fil conducteur (voir 4.1 p. 102), Becquerel traite des répétitions par Édouard Sarasin et Lucien de la Rive ainsi que celles de René Blondlot faites en 1891.

Dans le second chapitre (repris depuis le cours de Potier), Becquerel s'attèle à donner une description rapide de la théorie de Maxwell et de ses résultats. En quelque paragraphes il résume l'idée de Maxwell selon laquelle tous les courants sont fermés, et soumis à la condition de conservation de la densité de courant, qu'il présente comme étant la même que l'incompressibilité pour un fluide,⁵³ sans pour autant affirmer que l'électricité est un fluide. Par opposition aux « courants de conduction », il introduit le terme de « courants de déplacement ». Il compare les premiers à un transport de matière dans un fluide visqueux, avec une perte de charge qui serait due à l'effet Joule, alors que pour les seconds il donne l'analogie avec un ressort, par le comportement élastique sans perte d'énergie.

52. Pour une description de l'expérience voir Lequeux 2014, p. 63-4.

53. « à la condition qu'un fluide homogène dont la vitesse serait en chaque point égale à cette densité du courant conserverait la même masse par unité de volume, pendant le mouvement », Becquerel 1897, p. 512.

Becquerel reprend ici une présentation très classique de la notion de courant de déplacement, que Potier fait dès ses articles de 1873 (voir 9.1). Soulignons que si les analogies peuvent donner une idée quelque peu matérielle du phénomène, à aucun moment le milieu de propagation n'est évoqué, et le rôle du champ n'est absolument pas mis en avant. La « théorie de Maxwell » d'après ce qui ressort du cours de Becquerel pourrait se résumer d'après une seule de ses phrases :⁵⁴

Maxwell a supposé que même dans les circuits ouverts, les courants étaient fermés, et se fermaient au travers des diélectriques, en même temps que les charges se modifient à la surface des conducteurs.

Cette phrase, si elle résume l'une des hypothèses de Maxwell, occulte complètement les points essentiels évoqués plus haut (milieu de propagation, rôle primordial du champ, ...) et une simple analogie mécanique pour le courant de déplacement ne peut suffire à les expliquer. Si Potier est un peu plus disert dans son cours de 1893, en justifiant l'expression du courant de déplacement dans le diélectrique,⁵⁵ on garde vraiment l'impression que le diélectrique *dans le condensateur* n'est présent que pour fermer le circuit, et il n'y a aucun commentaire qui est fait sur le diélectrique en dehors du circuit. Par exemple, le cas d'un circuit électrique (conducteur) fermé ne semble pas, pour Potier, devoir impliquer un recours à la théorie de Maxwell.

Passés ces quelques paragraphes où Becquerel utilise les analogies pour introduire certaines notions, le cours devient d'ailleurs purement mathématique. Une fois données les relations entre densité de courant et force électrique pour les deux types de courants (conduction et déplacement), Becquerel passe directement à l'établissement des équations de propagation. Il en déduit la valeur de la vitesse de propagation et l'exprime en fonction du rapport des unités, et de la constante diélectrique. Dans un second temps il introduit la force magnétique, et établit les relations entre force magnétique, densité de courant et force électrique.⁵⁶ Le reste du cours est dédié à la résolution de l'équation de propagation et à la forme des solutions. Becquerel aborde les cas de la réflexion et de la réfraction des ondes, pour lesquels il retrouve les lois de Snell-Descartes pour l'optique, ainsi que le cas d'un diélectrique non-isotrope.

54. Becquerel 1897, p. 512.

55. Après avoir évoqué des pressions dans le diélectrique qui ferme le circuit, et qui créent des densités de charge à la surface des conducteurs il avance : « À la variation de ces charges correspond une variation dans la valeur de la force électrique dans le diélectrique ou une modification de celui-ci. c'est cette modification que Maxwell assimile au passage d'un courant » Potier 1893, §262.

56. Avec les notations déjà introduites dans la Partie I : $\nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{J}$; $\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \nabla \wedge \mathbf{E}$ et $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$. Becquerel considère probablement un milieu homogène et isotrope, même s'il ne le précise pas à ce niveau.

Le cours de Cornu

Sur la même période, l'autre professeur de physique, Alfred Cornu, n'aborde pas la théorie de Maxwell dans ses cours. Il traite très rapidement des « ondes électriques », se concentrant surtout sur la production et la détection de perturbations électriques de très courte période, et détaillant le dispositif de Hertz (excitateur et récepteur). Sur la vitesse des ondes ainsi créées, Cornu fait surtout référence aux récentes expériences de René Blondlot. Ce point est d'ailleurs repris par Michel Atten dans sa thèse, qui souligne que les expériences de Hertz ont commencé à être acceptées en France essentiellement après les répétitions par René Blondlot.⁵⁷ Cornu n'aborde que très succinctement le lien entre optique et électromagnétisme, au travers d'un paragraphe « Assimilation aux ondes lumineuses » où il remarque que « si réellement les ondes électriques se propagent dans l'éther avec la même vitesse que les ondes lumineuses, rien ne doit les distinguer si ce n'est leur période qui est 10.000 à 1.000.000 de fois plus courte ».⁵⁸

Avec la succession des professeurs Jamin, Potier et Becquerel, nous avons mis en avant une présence de plus en plus importante de l'éther optique, de plus en plus détaillé en même temps que le sont les différentes théories de la lumière. Paradoxalement, l'éther électromagnétique reste complètement absent de l'enseignement, très succinct, qui est fait de la théorie de Maxwell. Cette absence semble à contre-courant de l'évolution des théories électromagnétiques qui accordent une place de plus en plus importante au milieu : les physiciens britanniques, mais également les physiciens français, à l'image de Marcel Brillouin, développent des modèles d'éther électromagnétique.⁵⁹ De la même façon, l'importance croissante de l'électricité ne se fait pas ressentir à Polytechnique.

6.4 La difficile percée de l'électricité

Un enseignement insuffisant

Si la physique tient une place bien définie dans le paysage de l'enseignement polytechnicien, et que l'électrostatique y est évidemment enseignée, cet enseignement n'est que théorique et le cas est bien différent pour l'électricité. Entre négligence coupable ou mauvaise appré-

57. Voir Atten 1992.

58. Cornu 1898, p. 381.

59. Sur les travaux de Brillouin voir : Atten 1992, chap. 14, pp. 214-26.

ciation de la dynamique industrielle, il est difficile de trancher. Mais la conclusion est sans appel : l'électricité industrielle reste longtemps aux portes de Polytechnique.

Plaider un désintéressement complet des enseignants pour les applications de l'électricité serait exagéré. Lors de l'Exposition de 1881, une visite est organisée par l'école. Ainsi Cornu, dans une conférence préparant cette visite, annonce :⁶⁰

Jamais, peut-être, messieurs, votre intelligence n'aura reçu une réponse à la fois plus nette et plus complète à cette question que dans la visite que vous allez faire à l'exposition d'électricité [...]

Avant de conclure :⁶¹

Votre visite à l'exposition d'électricité ne peut donc manquer d'être utile à la grande majorité d'entre vous.

Mais si la visite à l'exposition peut laisser imaginer que le wagon polytechnicien va prendre le train (ou plutôt le tramway) de la dynamique industrielle, force est de constater que la situation n'a pas évolué près de quinze ans plus tard. Dans un rapport du comité de perfectionnement de l'École de 1894, les difficultés à appréhender l'électricité sont mises en avant :⁶²

De ce sujet qui touche à l'enseignement de l'École, quelques membres présentent diverses observations sur l'insuffisance actuelle du programme de l'enseignement intérieur de l'Électricité, sur l'utilité qu'il y aurait à montrer aux élèves une usine d'électricité en activité, et en général sur la question des visites dites industrielles faites par les élèves.

Il est entendu que ces questions seront examinées lors de l'étude du Programme de l'enseignement, étude qui se fait tous les 10 ans environ, et qui sera entreprise dès 1894, à la reprise des études.

La révision des programmes dont il est fait mention est celle ayant mené à l'échange dans le programme des deux années de physique. Les promotions antérieures, n'ayant pas été concernées par cette modification, ont donc probablement suivi un enseignement moins

60. Cornu 1881, p. 1 conclusion. Notons que l'interpellation « messieurs » demeurera encore longtemps puisque les premières femmes admises Polytechnique ne le seront qu'en 1972. À titre de comparaison, les premières femmes diplômées de l'école Centrale le sont en 1921, et la première admise à l'École Normale Supérieure en 1910.

61. *Ibid.*, p. 18 conclusion.

62. École Polytechnique 1894 (c), séance du 11 janvier 1894.

poussé en électricité, et les conséquences s'en retrouvent au sein des écoles d'application. À l'École d'Application du Génie et de l'Artillerie, qui est l'une des quatre principales écoles d'application de Polytechnique, le comité de direction constate même des lacunes inquiétantes dans ce domaine, ce qui pousse le général en charge de l'école à demander un rapport sur les résultats à l'officier en charge du cours. Dans son rapport, daté de novembre 1895, l'officier en question écrit :⁶³

Les professeurs du cours de sciences appliquées ont constaté chez un grand nombre d'officiers-élèves, et cela depuis plusieurs années déjà, une ignorance presque complète de l'établissement et des usages des unités électriques indispensables pourtant à connaître et à manier aisément dans les applications. Les énoncés des théorèmes fondamentaux de l'électricité statique et dynamique sont souvent ou oubliés ou incompris de la plupart. Chez ceux qui, plus heureux, paraissent avoir retenu ou compris plus complètement l'enseignement théorique, on remarque clairement qu'ils ne savent distinguer soit l'importance relative des principes, soit leur utilité plus ou moins immédiate en vue des applications pratiques.

Plusieurs remarques sont à faire concernant ce rapport. Premièrement, il ne met pas directement en cause l'enseignement à Polytechnique, mais pointe du doigt le niveau des élèves à leur sortie dans ce domaine, et sur différentes promotions. Concernant le niveau général des élèves en question, soulignons — comme nous le verrons au chapitre prochain — que ceux qui intègrent l'École du Génie et de l'Artillerie ne sont pas les mieux classés parmi les sortants. Ils restent néanmoins des élèves sortis de Polytechnique, ce qui implique des capacités certaines. D'autre part, ce rapport est rédigé fin novembre 1895, il concerne uniquement la première promotion sortie de Polytechnique après la révision des programmes de 1894, qui n'a donc pas forcément été tout à fait mise en place. Néanmoins, le rapport souligne que ce problème est observé depuis plusieurs années.

Les programmes d'admission et d'enseignement intérieur seront ré-évalués près de dix ans plus tard, en 1903. L'électrostatique et le magnétisme, qui étaient jusque-là abordés à Polytechnique, sont complètement transférés en mathématiques spéciales (classe de préparation) et étudiés en particulier sous le prisme de l'expérience, alors que l'électrodynamique et l'électromagnétisme restent la chasse gardée de l'école. Cette division est proposée par Henri Aubusson de Cavarlay, alors professeur à l'École d'Application du Génie Maritime depuis dix ans. Elle est faite de telle sorte que les différents phénomènes électriques et magnétiques

63. École du Génie et de l'Artillerie 1895. Le rapport complet est joint en annexe. Voir Annexe n°9.

soient connus avant l'entrée à l'école Polytechnique, qui a alors pour double objectif de :⁶⁴

- 1 ° Synthétiser en un corps de doctrine les lois ainsi constatées, en montrant comment elles peuvent être déduites d'un nombre restreint d'hypothèses fondamentales. C'est le moyen de coordonner les idées, de définir et de relier entre elles les diverses grandeurs électriques.
- 2 ° Apprendre, théoriquement et pratiquement, à mesurer ces grandeurs.

Aucune justification particulière n'est apportée sur cette modification du programme d'électricité — modification assez importante au regard des autres matières. L'évolution dans le domaine des ondes hertziennes et leur application à la télégraphie sans fil, développée par Marconi pendant cette période, n'est par exemple pas citée.

Un constat implacable

Si la modification des programmes peut paraître essentiellement formelle, elle cache cependant une prise de conscience parmi le corps enseignant : l'enseignement de l'électricité à Polytechnique est trop loin des applications pratiques. Aubusson de Cavarlay, à nouveau, remarque :⁶⁵

Il semble que l'on regrette à l'école (polytechnique) d'avoir vu passer l'électricité du domaine des curiosités scientifiques dans celui de l'application industrielle : on s'obstine à ne pas parler le même langage que les ingénieurs sous le prétexte que ces ingénieurs ont une tendance à tout sacrifier à la commodité, en supprimant de leur bagage les belles théories auxquelles nous devons les premiers progrès de l'électricité. L'excuse des ingénieurs, s'ils en ont besoin c'est que les théories en question sont incapables aujourd'hui de fournir directement un exposé clair des phénomènes complexes que l'on rencontre en électricité industrielle.

64. École Polytechnique, 1903, p 9-10 et 15-16. Henri Aubusson de Cavarlay (1860 - 1946) fit partie de la promotion X 1881, avant d'intégrer l'École d'Application du Génie Maritime, puis de devenir enseignant de physique dans cette école en 1894.

65. *Ibid.*, p. 16.

Pour préciser davantage, on s'obstine à l'École à traiter tous les problèmes en parlant des formules d'Ampère, en évitant avec soin de se servir des notions intermédiaires, du flux et du circuit magnétique, et cela sous le prétexte que les méthodes d'investigations d'Ampère sont admirables (ce que personne ne conteste), qu'elles sont éminemment propres à développer le sens mathématique des élèves, et qu'enfin les notions de flux et de circuit magnétique nous viennent de l'étranger ! On conçoit que ces considérations sont parfaitement indifférentes aux moyens de calculer les proportions d'un alternateur, par exemple, alors que les notions de flux et de circuit magnétique le donnent très facilement, les ingénieurs ont donné une fois pour toutes au flux et au circuit magnétique leurs lettres de grande naturalisation et ces notions sont devenues le point de départ, en quelque sorte, de tous leurs raisonnements.

Et le conseil de confirmer les propos de l'enseignant :⁶⁶

Ce que dit là M. de Cavarlay est tellement vrai que, dans les écoles d'application l'on est actuellement obligé de consacrer le début du cours d'Électricité industrielle à l'exposé de ces théories, devenues fondamentales pour les ingénieurs. Ce serait à l'École Polytechnique à les enseigner puisqu'elles ont le caractère des théories générales et qu'elles se rattachent intimement à la démonstration et à la discussion des principes.

Membre de la communauté enseignante « élargie » de Polytechnique (comme professeur dans l'une des écoles d'application) et ancien élève, Aubusson de Cavarlay dresse un constat pertinent sur l'état de l'enseignement de l'électricité en 1903. Les préférences vont vers les théories canoniques de la physique française, dont la figure de proue pour l'électricité est Ampère. Les arguments en faveur de celui-ci sont d'ailleurs plus ou moins objectifs : qualité mathématique et clarté des raisonnements sont mis en avant, mais on trouve également un refus de notions dues aux scientifiques étrangers. Cette omission des théories étrangères est même nettement visible dans les cours, où les noms d'Ampère, mais aussi de Fresnel ou de Coulomb, apparaissent régulièrement. À l'inverse, ceux de W. Thomson et de Maxwell côté britannique, ou de Helmholtz côté allemand, sont quasiment absents. Notons qu'Aubusson de Cavarlay est favorable aux outils comme les lignes de force ou le flux, mais qu'il n'évoque à aucun moment le rôle de l'éther, qu'il connaît néanmoins (voir le chapitre suivant). Nous avons vu dans l'étude des machines électriques que les lois fondamentales étaient largement

66. *Ibid.*

abordées, pour être finalement peu utilisées, car tout simplement peu utiles pour décrire une machine complexe.

À cette préférence géographique on peut ajouter, à notre avis, une préférence encore plus locale pour les travaux issus de Polytechnique. Ampère, Coulomb et Fresnel, pour ne citer qu'eux, étaient tous trois polytechniciens (Fresnel fut élève, Ampère et Coulomb parmi les premiers enseignants à l'École). Et ici se trouve la deuxième raison de ce retard : l'inertie institutionnelle d'un établissement centenaire, installé sur les bases de la physique française du début du XIXe siècle. Le recrutement du corps enseignant ne se fait que parmi les anciens élèves — à quelques exceptions près venant de l'École Normale —, venant perpétuer une tradition à laquelle ils ont été formés. Le programme d'enseignement intérieur, comme nous l'avons déjà mentionné, n'est ré-évalué que tous les dix ans, alors que le rythme des innovations — en particulier en électricité — ne cesse de croître dans cette fin de XIXe siècle.

Conclusion

À la fin du XIXe siècle, Polytechnique représente une base solide dans plusieurs domaines. D'une part, elle constitue la formation théorique, première étape pour tous les futurs ingénieurs des corps de l'État. D'autre part, elle est ancrée dans une tradition presque centenaire de physique mathématique, liée aux grands noms qui sont passés dans ses murs. Cette tradition est parfaitement assumée pour l'optique, où l'éther est un concept connu des étudiants, qui revient régulièrement dans les cours. De même, pour les phénomènes électriques et magnétiques, les lois de Coulomb ou d'Ampère sont largement étudiées.

Mais certaines notions peinent à trouver leur place, et se heurtent constamment à ces acquis de la physique française du début du siècle. Ainsi, la théorie de Maxwell, qui n'arrive que tardivement à l'X, est sans cesse comparée à la théorie de Fresnel, et d'après ce qui ressort des cours, cette comparaison semble être à charge. Ce retard ne peut d'ailleurs être imputé à une méconnaissance des enseignants, puisqu'Alfred Potier est parfaitement au courant de la théorie de Maxwell. Mais on semble lui attribuer un caractère toujours trop hypothétique pour la considérer. La question du milieu n'est pas même évoquée, et seules les équations décrivant la propagation subsistent.

Par ailleurs, ce double poids de la formation et de l'histoire semble, dans certains domaines, faire vaciller la géante : pour l'électricité, les connaissances qui y sont enseignées ne

sont pas adaptées à un monde en perpétuelle évolution. Le délai de révision des programmes, de dix ans, semble ridiculement long comparé à l'enchaînement annuel des expositions internationales d'électricité. Les conséquences s'en font sentir dans les écoles d'applications, où les nouvelles techniques ne sont pas maîtrisées. Entre inertie académique et préférence nationale, Polytechnique ne se met que tardivement aux nouvelles théories électromagnétiques.

Pauvre petite étincelle de nos
informes machines d'hier, elle
aura été l'aurore d'une
civilisation nouvelle.

Henri de Parville

Chapitre 7

Les écoles d'application se mettent à l'électricité

Après leur formation à Polytechnique, les élèves-officiers intègrent une école d'application, où ils reçoivent une formation pendant trois ans avant d'intégrer le corps d'État correspondant. Au sein de ces écoles, l'enseignement est très proche de celui donné à Polytechnique. La principale raison est le caractère endogène du système des grands corps, qui intègre peu d'éléments extérieurs. Dans ces conditions, un enseignement de l'électricité comme matière à part entière se met en place de façon progressive et assez tardive, vers la fin des années 1880.

La première partie détaille le fonctionnement de ce système d'application, en mettant en avant l'organisation autarcique des écoles, caractère qui a fait la solidité du système sur le long terme mais peut apparaître désavantageux pour l'entrée de nouvelles notions. Nous traiterons dans la deuxième partie des raisons et des modalités de l'arrivée de l'électricité. Enfin, en nous basant sur les cours des principales écoles nous montrerons dans les troisième et quatrième parties que l'enseignement des notions théoriques en lien avec l'électricité dépend très largement des choix du professeur ; d'autre part, les notions nouvelles comme les lignes de force entrent peu à peu dans le paysage français mais peinent à s'affirmer par rapport aux notions plus anciennes comme les actions à distance.

7.1 Un système bien rodé

Le recrutement

Les domaines d'exercice des élèves sortant de Polytechnique sont nombreux. Dans les

statuts de l'École on trouve ainsi une douzaine de secteurs : Ponts et chaussées ; Mines ; Artillerie de terre et de mer ; Génie militaire et génie maritime ; Marine nationale ; Corps des ingénieurs hydrographes ; Commissariat de la marine ; Manufactures de l'État ; Corps des ingénieurs des poudres et salpêtres ; Lignes télégraphiques.¹ En pratique, seuls les grands corps (Ponts et Chaussées, Mines), le Génie et l'Artillerie sont intégrés de façon récurrente. L'affectation des officiers-élèves dépend du nombre de places allouées à une école — variable selon les années — et du rang de l'élève au classement de sortie.

Deux catégories d'affectation sont à distinguer. L'ensemble des carrières civiles est désigné dans l'argot polytechnicien par la « botte ». Les écoles y sont volontiers considérées par leur prestige : les Mines sont la « fine botte », les Ponts et Chaussées sont la « grande botte », et la « petite botte » désigne les autres domaines civils (Génie maritime, Constructions navales, Manufactures de l'État, Télégraphes, Hydrographie, Poudres et Salpêtres).² Le « bottier », major à la sortie, et ses camarades les mieux classés, intègrent les Mines réservées à une élite : de 2 à 4 élèves par an. Viennent ensuite les Ponts et Chaussées, qui disposent d'un effectif plus fourni, avec au moins 8 élèves (qui peut monter jusqu'à 18). Le Génie maritime a un effectif assez stable de 5 élèves. Très peu d'élèves sont affectés dans les autres services : à titre d'exemple, en 1892, 1 élève a intégré le Corps des hydrographes et 1 autre a intégré l'École Professionnelle Supérieure des Postes et Télégraphes (nouvelle version de l'EST).³

Tous les autres élèves (plus de cent) ayant satisfait aux examens de sortie intègrent les corps militaires, avec une formation à l'École d'application de l'Artillerie et du Génie. Les élèves intègrent l'école avec un statut « d'élève d'artillerie » ou directement de « sous-lieutenant élève d'artillerie ». Ils en sortiront avec le grade de sous-lieutenant ou de lieutenant. Cette école est celle qui prépare aux différents corps militaires, mais les élèves se voient affectés à un corps précis dès leur entrée, et suivent probablement un enseignement adapté. Ainsi, en 1886, 20 élèves sortant de Polytechnique sont affectés au « Corps de l'artillerie de la marine et des colonies », dont 19 l'intègrent officiellement en 1888 en sortant de l'École d'application de l'Artillerie et du Génie (1 élève n'ayant pas satisfait aux examens).⁴

1. *Journal Officiel* (abrév. *JO*) 23 février 1881, p. 1008.

2. Lévy A. et Pinet G. 1894 p. 71. Une explication possible du terme de « botte » est son attribution par antiphrase à ces carrières civiles où, justement, on ne portait plus de bottes. À ne pas confondre avec les « pantouffards », moins motivés, et dont la signification n'est pas restée confinée à Polytechnique. Voir : Combet 1978.

3. Statistiques réalisées sur les années 1885 à 1892 et tirées des déclarations du *JO*.

4. *JO*, 21 août 1882, p. 3882 ; *JO*, 20 septembre 1888, p. 3885.

Les écoles

Nous ne retiendrons ici que les trois principales écoles des secteurs civils. L'école d'application la plus prestigieuse est sans conteste l'École des Mines de Paris. Créée en 1783, elle subit les changements politiques du tournant du siècle, avant de renaître définitivement à Paris en 1816 (voir 12.1). Elle devient à partir de 1882 « l'École Nationale Supérieure des Mines ». L'objectif qu'elle poursuit, dès sa création, est de « former les ingénieurs du corps des mines et de donner l'enseignement technique nécessaire aux jeunes gens qui se destinent, dans l'industrie privée, à l'exploitation des mines ». ⁵ La scolarité est composée de trois années de cours spéciaux, précédée éventuellement d'une année de cours préparatoires (voir plus bas tableau 7.1). Les élèves de l'école ont différents statuts. Les élèves-ingénieurs sont ceux qui intégreront le Corps des Mines ; ils sont nommés par décret et exclusivement recrutés parmi les élèves de Polytechnique. Les élèves externes sont « préparés pour les positions variées qu'offre l'industrie » en particulier les postes d'ingénieur ou de directeur d'exploitation ; ils sont recrutés par concours externe. Les élèves étrangers sont admis sur autorisation du ministre, suite aux demandes des ambassadeurs des pays concernés ; ils doivent certifier d'une formation suffisante. Enfin, les auditeurs libres formulent une demande personnelle et sont également soumis à l'autorisation du ministre. ⁶

L'enseignement est commun à tous les élèves, à l'exception des travaux pratiques auxquels les élèves étrangers ne participent pas. L'école a également mis en place depuis 1844 des cours préparatoires destinés aux élèves externes. Les élèves de Polytechnique qui intègrent l'école sont dispensés des cours préparatoires, qui sont très proches de ceux qu'ils ont déjà suivis (Physique, Chimie, Géométrie descriptive, Analyse, Mécanique). ⁷ Les élèves polytechniciens en question sont, comme nous l'avons signalé plus haut, les meilleurs de la promotion sortante. Parmi eux, plusieurs noms célèbres reviennent comme Henri Poincaré, Alfred Potier, ou encore Alfred Liénard parmi les physiciens. Les enseignants des Mines sont eux-mêmes issus de ce système. Ainsi, Potier deviendra professeur d'électricité industrielle aux Mines à partir de 1893. ⁸ Précisons ici le cas de l'École des Mineurs de Saint-Étienne. Créée en 1816, l'école n'est pas une école d'application de Polytechnique, et se défend de le devenir. Néanmoins la formation y est assurée, à la fin du XIXe siècle, par des ingénieurs du corps des Mines qui sortent de Polytechnique, comme Alfred Liénard, qui reviendra ensuite à Paris en 1908 pour

5. Office National des Universités et Écoles Françaises 1914, p. 93.

6. *JO*, 28 août 1889, p. 4198.

7. *Ibid.*

8. Troost 1905.

être sous-directeur puis directeur de l'École des Mines. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre sur Liénard (chap. 12).

La deuxième école d'application, celle des Ponts et Chaussées, possède le même profil que les Mines de Paris, bien qu'elle soit plus ancienne (elle date de 1747). À la fin du XIXe siècle, le recrutement se fait de la même façon que pour l'École des Mines : intégration directe pour les élèves sortant de Polytechnique, recrutement sur concours pour les élèves extérieurs. Le schéma de cours est identique également, avec trois années de cours spéciaux et une année de cours préparatoires. Parmi ces cours spéciaux, il n'y a pas de cours de physique, celle-ci restant cantonnée aux cours préparatoires.⁹

La dernière école que nous détaillerons ici est l'École d'application du Génie Maritime. Créée au XVIIIe siècle, l'école est successivement installée à Paris, Toulon, puis Brest. Un premier retour à la capitale en 1854 est interrompu par un déménagement à Cherbourg de 1872 à 1882, avant un retour définitif dans le milieu parisien.¹⁰ Dans le cadre de ce retour, il est intéressant de noter l'un des arguments de l'auteur de la proposition de décret, le ministre de la Marine Auguste Gougeard, qui motive sa demande par la richesse proposée par les cercles parisiens intellectuels et industriels :¹¹

Appelés par leurs fonctions à appliquer les procédés industriels dans tout ce qu'ils ont de compatible avec la discipline des arsenaux, c'est à Paris, au centre de la science et de la découverte, au milieu des grands ateliers, de vastes usines de spécialités très différentes, que les ingénieurs trouveront les plus fructueux sujets d'étude et le moyen d'améliorer et de tenir à la hauteur du progrès les chantiers tenus par leurs prédécesseurs et les constructions qui en sont sorties.

La scolarité s'y déroule en deux ans et intègre des stages, notamment dans les arsenaux. Ici encore, les enseignants sont tous d'anciens élèves. Ainsi, pour le cours d'électricité, trois enseignants se succèdent sur les deux décennies au tournant du siècle. Le premier est François Alheilig à partir de 1890.¹² François Alheilig est entré à l'École Polytechnique en 1879 (son frère, Henri Émile, l'imitera en 1886). Il a donc suivi les cours de physique d'Alfred Cornu (rappelons que les deux professeurs alternent d'une année sur l'autre, les élèves ont donc le même professeur de physique pendant les deux années.). Il choisit ensuite le Génie Maritime

9. Pour les corps d'état et la création des écoles relatives voir : Belhoste 1989. Pour le programme de l'École des Ponts voir : École Nationale des Ponts et Chaussées 1897.

10. *JO* 26 janvier 1882 p. 458. L'École d'application du Génie Maritime est l'ancêtre de l'École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA) aujourd'hui située à Palaiseau, à côté de Polytechnique.

11. *Ibid.*

12. François Joseph Augustin Alheilig, 1860-1914.

en 1881, puis est nommé ingénieur 1^{re} classe en 1885. Alheilig prend la Direction du Génie Maritime en 1911, quelques années après avoir reçu le grade d'Officier de la Légion d'honneur. Aucune publication de sa part n'a été relevée dans les différents journaux ou comptes-rendus.

Le deuxième enseignant débute en 1894, personnage que nous avons déjà rencontré pour ses interventions sur l'enseignement de l'électricité à Polytechnique : il s'agit de Henri Aubusson de Cavarlay, qui fait partie de la promotion de Polytechnique 1881.¹³ Il a donc suivi, lui aussi, les cours de physique de Cornu, et a probablement visité l'exposition d'électricité qui se tenait à Paris fin 1881. Il a un parcours très similaire à celui de son aîné Alheilig, puisqu'il s'engage lui aussi dans le Génie Maritime, obtient le grade d'ingénieur 1^{re} classe en 1888 et débute comme professeur à l'École d'application du Génie Maritime en 1894, dont il deviendra sous-directeur quelques années plus tard. Lui non plus ne publiera pas d'article dans les revues scientifiques.

Enfin, Henri Marie Royer, qui prend le cours à partir de 1906, a fait partie de la promotion 1892 de Polytechnique. Il a eu comme professeur Alfred Potier, et notamment le premier cours à Polytechnique sur la théorie électromagnétique de Maxwell que Potier introduit en 1893-94. Comme les deux autres polytechniciens dont nous avons parlé, il choisit le Génie Maritime, puis enseigne les cours de mécanique et de machines à vapeur à l'École secondaire de Maistrance à Rochefort à partir de 1900. Son cours donné à l'École du Génie Maritime, à partir de 1906, sort légèrement du cadre de notre étude, mais il permet une comparaison avec ses deux prédécesseurs.¹⁴

Les cours préparatoires

Ces trois écoles, notamment l'École des Mines et l'École des Ponts et Chaussées, accueillent aussi des élèves n'ayant pas suivi le cursus de Polytechnique. Ces élèves assistent aux cours préparatoires, en particulier ceux de physique. La plupart d'entre eux seront amenés à occuper des fonctions d'ingénieurs, il est donc nécessaire de préciser le contenu de ces cours préparatoires pour évaluer les connaissances en physique de ces futurs ingénieurs. À l'École des Ponts, c'est Charles-Marie Gariel qui est en charge du cours de physique.¹⁵ Ingénieur des Ponts et Chaussées (sorti de l'école en 1866), Gariel est également professeur de physique à la faculté de médecine de Paris à partir de 1871, et sera directeur des études à

13. Henri Auguste Marie Edouard Aubusson de Cavarlay, 1860 - 1946.

14. Source : Base Léonore. Alheilig : dossier LH/18/86. Aubusson de Cavarlay : dossier 19800035/212/27845. Royer : dossier 19800035/1394/61114.

15. *Ibid.*

l'École Municipale de Physique et Chimie Industrielles à partir de 1898.¹⁶

Le cours de physique que Gariel donne à l'École des Ponts et Chaussées à la fin des années 1880 est édité en deux volumes. L'optique est répartie sur les deux tomes. La question de l'éther est traitée dans le second, dans un paragraphe sur la « théorie des ondulations ». Gariel expose que celle-ci a remplacé la théorie de l'émission, notamment car elle a permis d'expliquer plusieurs faits expérimentaux, qu'il ne précise pas. Il nuance en disant que « malgré ces caractères qui sont en faveur de l'hypothèse des ondulations, on ne saurait d'une manière certaine la regarder comme représentant la réalité ». Il détaille ensuite les grandes lignes de cette théorie, et en premier lieu l'existence d'un milieu, nommé « éther » ou « éther lumineux » qui emplit tout l'espace, y compris le vide « comme la chambre barométrique » et qui « pénètre les corps ». Sur la nature même de l'éther, il expose sans le citer un modèle qui est très similaire à celui de Fresnel (voir Annexe n° 2) : un éther constitué d'atomes éloignés les uns des autres, et qui « tend[ent] à revenir à leur position d'équilibre » lorsqu'ils en sont éloignés. Un peu plus loin, Gariel établit les lois de propagation de la perturbation en faisant cette fois référence à Fresnel.¹⁷

Concernant les phénomènes électriques, Gariel a du mal à se positionner sur les hypothèses à donner. Sur la nature de l'électricité, il nous dit :¹⁸

On ne sait si c'est un agent spécial, un fluide qui se rajoute au corps, ou s'il s'agit d'un mouvement moléculaire spécial, mouvement des molécules de l'éther ou des molécules matérielles, soit qu'il s'agisse d'un mouvement qui prend naissance ou d'un mouvement existant déjà et qui est modifié dans un de ses éléments. Sans insister, nous désignerons sous le nom *d'électricité* la cause quelle qu'elle soit qui produit l'électrisation.

Puis il enchaîne sur le principe d'action des corps électrisés, qu'il décrit comme une action de proche en proche :¹⁹

Comme pour le magnétisme, nous n'admettons pas que les attractions exercées par les corps électrisés se produisent réellement à distance : nous admettons que,

16. Source : Base Léonore : Dossier LH/1073/67. Dans sa publication de la correspondance de Poincaré, S. Walter avance que Gariel est également professeur de Chimie à l'École des Ponts à partir de 1879, bien qu'aucune trace de cette fonction n'ait été trouvée (Walter 2000, p. 164).

17. Gariel 1887, vol. II, p. 40.

18. Gariel 1887, vol. II, p. 183. Les italiques sont de Gariel.

19. *Ibid.* Les italiques ont de Gariel.

par la présence d'un corps électrisé, il se produit dans l'espace une modification, dont nous ignorons d'ailleurs la nature, modification transmise de proche en proche et qui, changeant les conditions dans lesquelles se trouve le pendule, provoque le mouvement de celui-ci. En un mot. il se forme un champ électrique autour d'un corps électrisé et c'est l'existence de ce champ qui modifie les conditions d'équilibre du pendule.

Un peu plus loin, Gariel explique l'hypothèse des deux fluides, puis l'hypothèse du fluide unique. Mais il ne revient sur la question de l'éther, ni ne mentionne Maxwell à aucun moment. Il ne traite pas non plus de la propagation de la force électrique ou magnétique. À la date de publication de ce cours en 1887, le *Traité* de Maxwell a pourtant déjà été traduit et il est probable que Gariel en ait pris connaissance.

Le cours de physique de Gariel est caractéristique des cours de physique donnés dans cette période des années 1880 dans les grandes écoles. La notion d'action à distance est rejetée, même si les lois mathématiques afférentes restent utilisées. De même, les hypothèses de fluides électriques et magnétiques sont décrites comme hypothèses de travail efficaces mais sans réalité. Le concept de champ (comme région de l'espace) apparaît de plus en plus, mais une description complète des phénomènes se heurte à l'absence d'un mécanisme de propagation : l'éther n'est pas utilisé en électromagnétisme, et les notions de force électrique ou magnétique ne sont pas vues comme des grandeurs pouvant se propager.

7.2 L'arrivée de l'électricité

Au sein de ces écoles d'application, l'électricité fait peu à peu son entrée. La motivation est toujours identique, justifiée par l'essor de l'industrie électrique. La plus prestigieuse de ces écoles n'échappe pas à la règle. La comparaison des programmes d'enseignement intérieur de l'École des Mines de 1878 et 1889 (voir tableau 7.1) permet de voir le passage d'une école du début du XIXe siècle à une école qui s'ancre dans la seconde révolution industrielle.

Parmi les changements notables, on trouve la création de leçons d'électricité appliquée, une augmentation du volume horaire consacré à la création de machines — le programme ne précise pas la nature de ces machines — et surtout l'apparition de disciplines tournées vers le domaine industriel, comme la chimie et l'économie. Pour justifier ces différents choix faits dans les modifications de volume horaire des cours, la direction de l'école met d'ailleurs explicitement en avant la volonté de donner un enseignement avancé sur les points particuliers

Année 1878		Année 1889	
Cours	Volume ho- raire	Cours	Volume ho- raire
Cours spéciaux			
Exploitation des mines	47	Exploitation des mines	47
Métallurgie	91	Métallurgie	84
Docimasia (séparation des minerais)	84	Chimie analytique	80
Minéralogie	43	Chimie industrielle	32
Paléontologie	20	Minéralogie	42
Géologie générale	84	Paléontologie animale	34
Géologie technique	20	Paléontologie végétale	8
Agriculture	12	Géologie générale	42
Topographie	12	Pétrographie	10
Machines	47	Géologie appliquée	42
Chemins de fer	19	Topographie	12
Construction	25	Machines	35
Législation et économie industrielle	25	Chemins de fer	42
Fortification	20	Applications de l'électricité	7
		Construction et résistance des matériaux	25
		Construction des machines	17
		Législation	42
		Économie industrielle	27
		Artillerie	20
Cours préparatoires			
Analyse et mécanique	53	Mécanique	50
Géométrie descriptive et applications	30	Analyse, géométrie descriptive et applications	45
Physique	24	Physique	45
Chimie générale	50	Chimie générale	50

FIGURE 7.1 – Tableau des cours donnés à l'École des Mines pour les années 1878 et 1889, volume annuel. Tiré de ENSMP 1889, p. 12-13.

de l'industrie :²⁰

On s'est attaché à conserver à l'enseignement de l'école des mines ce qui fait son caractère spécial [...] on s'est attaché à développer et à approfondir le plus possible toutes les connaissances qui se rattachent à l'industrie minérale en même temps qu'aux machines et aux chemins de fer, de manière à avoir, sur tous ces points, un enseignement vraiment supérieur.

Les cours sur les « applications de l'électricité » créés entre 1878 et 1889 sont jugés par la direction de l'école comme des « leçons bien nécessaires à raison du rôle si important que joue l'électricité dans le monde moderne ». ²¹ Cette orientation reflète d'ailleurs la dynamique de toutes les écoles supérieures à partir des années 1880 : l'électricité prend une place de plus en plus importante dans les industries ; il paraît donc nécessaire de mettre en place des cours dédiés. Si les leçons sont mises en place en 1887, la chaire d'électricité n'est créée qu'à partir de 1893, et attribuée à Potier.

À l'École des Ponts, la première chaire d'électricité appliquée est également créée en 1893, et confiée à André Blondel, ancien élève de l'école sorti en 1888. ²² C'est d'ailleurs lui qui désignera son ancien professeur Potier comme le « champion des théories de Maxwell » en France (voir chapitre précédent). Pour introduire son cours d'électricité appliquée, Blondel met surtout en avant le passage de l'électricité dans le domaine de l'industrie, grâce à l'amélioration des dispositifs et des puissances développées : ²³

Importance croissante des applications de l'électricité. - L'ère de l'électricité industrielle ne date guère à proprement parler que de l'exposition de 1881 ; c'est à ce moment qu'on a vu apparaître des machines capables d'alimenter non seulement un ou deux foyers à arcs, mais des réseaux de distribution d'énergie électrique pour l'éclairage par incandescence. Mais la puissance de ces machines était faible à côté de celles qu'on construit aujourd'hui, et il était difficile de prévoir la rapidité avec laquelle l'échelle des applications se développerait à tous les points de vue.

Lorsqu'il parle des objectifs du cours, Blondel insiste sur le fait qu'il s'agit d'un cours

20. ENSMP 1889, p. 11.

21. *Ibid.*

22. Base Léonore, Dossier : LH/260/3 André Eugène Blondel, p. 14. Blondel entre à l'X en 1883, il sort donc de l'École des Ponts en 1888.

23. Blondel 1902, p. 1. Les informations données dans les premières pages permettent de dater le cours de l'année 1896-1897.

de sciences appliquées, et qu'en conséquence une impasse est faite sur plusieurs points théoriques :²⁴

On ne devra pas perdre de vue, dans tout ce qui suit que l'esprit de ce cours qui s'adresse à des ingénieurs et non à des élèves de Sciences, sera tout différent de celui du cours de Physique où ils ont dû étudier déjà en partie les mêmes questions. On s'attachera beaucoup moins à la rigueur des démonstrations qu'à la recherche d'idées générales facilement accessibles et immédiatement utilisables [...].

Plus encore que l'importance croissante de l'électricité en général, c'est surtout la place que celle-ci trouve dans les applications pratiques pour le domaine concerné qui entraîne la création de cours dédiés. Ainsi Blondel, dans son cours aux Ponts et Chaussées « s'attachera surtout [aux applications] qui ont le plus d'importance pour les Ingénieurs des Ponts et Chaussées ». ²⁵ Il en est de même pour la Marine, où l'électricité prend dès les années 1880 une importance considérable. En 1889, l'introduction du cours d'électricité à l'École des officiers torpilleurs, professé par Henri Leblond, met en lumière ce rôle : « Les applications de l'électricité ont pris, depuis quelques années, dans la marine militaire, un développement considérable » en donnant de nombreux exemples : sonneries électriques, téléphones, mise en feu électrique des canons, éclairage, etc. ²⁶

Dans l'introduction du cours qu'il donne à l'École d'application du Génie Maritime, Henri Aubusson de Cavarlay raconte la place nouvelle de l'électricité :²⁷

Une fois l'Électricité à bord, elle trouve son emploi à mille usages. Elle convient merveilleusement à la production des signaux de nuit par la rapidité d'allumage et d'extinction des lampes à incandescence ; elle offre de nouvelles garanties de sécurité dans l'éclairage des soutes à munitions et des soutes à charbon ; on lui demande aujourd'hui d'éclairer toutes les parties du bâtiment. Elle vient en cela fort à point à l'époque où le compartimentage du navire, et le grand nombre d'appareils qu'il renferme, nécessitent l'entretien d'une lumière abondante durant même tout le jour.
[...]

24. *Ibid.*, p. 4-5.

25. *Ibid.*

26. Sur l'introduction de l'électricité dans la Marine voir la thèse de Didier Robineau (Robineau 2019). Je remercie Didier pour les discussions que nous avons eues sur ce sujet.

27. Aubusson de Cavarlay 1894, p. 1.

Si donc l'Électricité a mérité dans ces dernières années à tant d'égards l'attention de l'ingénieur de la Marine, elle s'impose maintenant à son étude comme une science primordiale parmi celles qu'il doit posséder.

7.3 Le contenu des cours

Si l'arrivée de l'électricité est largement justifiée par les principaux acteurs, comment peut-on considérer les cours d'électricité donnés dans les écoles par rapport aux cours de physique, plus théoriques, donnés notamment à Polytechnique ?

Les notions fondamentales

L'approche des notions théoriques sur l'électricité varie énormément selon les enseignants. Pour s'en convaincre, on peut comparer les trois cours d'électricité, donnés à quelques années d'intervalle au sein de l'École d'application du Génie Maritime, et s'intéresser de plus près aux hypothèses sur la nature de l'électricité et des phénomènes électromagnétiques en général qui y sont détaillées. Le premier titulaire du poste est François Alheilig. Dans son cours, il dédie les deux premiers chapitres aux généralités sur l'électricité. Il aborde notamment la question des unités de mesure, et seule l'hypothèse des deux fluides est donnée pour expliquer l'électricité. Sur le magnétisme, il définit les notions de force magnétique, de champ et de lignes de force. On retrouve donc dans ce début de cours les éléments les plus basiques sur l'électricité et le magnétisme.

À la fin de son cours, Alheilig propose une « liste d'ouvrages à consulter », dans laquelle on retrouve certains ouvrages déjà mentionnés : le *Traité* de Maxwell (édition de 1885, la traduction), et les deux cours : *Cours d'électricité* de Leblond à l'École des officiers torpilleurs, et le *Cours de physique à l'École Polytechnique* de Potier. On peut donc raisonnablement supposer qu'il a une certaine connaissance de la théorie de Maxwell et des concepts qui s'y rapportent, notamment sur l'éther. D'autre part, il se base sur le cours de Potier que nous avons déjà développé plus haut. Il est lui-même ancien polytechnicien, et il avait suivi en 1879 le cours de Jamin qui, s'il n'était pas très explicite sur la nature de l'électricité, allait tout de même plus loin que ce qu'Alheilig présente ici.

Le peu d'explications données relève donc plutôt de choix faits sur les éléments à aborder, plutôt qu'une éventuelle méconnaissance de ces théories. Sur ce point, on peut souligner que sa volonté est probablement contrariée par le manque de temps alloué à ce cours, comme en témoigne ses propos lorsqu'il donne sa liste d'ouvrages à consulter : « Nous terminons

ici ce cours, en regrettant que l'espace restreint dont nous disposons ne nous ait permis que d'exposer d'une façon très sommaire la plupart des questions qui y sont traitées. »

Le second cours que nous détaillerons est celui donné par Henri Aubusson de Cavarlay (abrév. de Cavarlay) pour l'année 1894-95, pour sa première année en tant qu'enseignant dans cette école. Chez de Cavarlay, le cours commence par un rappel des hypothèses sur la nature de l'électricité :²⁸

Hypothèse des fluides - Proportionnalité des quantités aux forces - On connaît les diverses hypothèses faites sur la nature des causes des phénomènes électriques et magnétiques : existence des fluides, orientations des aimants élémentaires, tension des diélectriques, *ondulations* de l'éther, etc. Aucune n'a pu encore servir de base à l'édification d'une théorie complète, et, *bien que l'hypothèse des ondulations de l'éther paraisse seule susceptible de satisfaire l'esprit dans l'explication des phénomènes qui se rattachent à la production des courants électriques*, on conserve dans l'expression des lois de l'électricité et du magnétisme, l'hypothèse des fluides avec les notions de quantité, de densité, d'intensité, etc, qu'elle comporte.

Ce passage est intéressant car il illustre le fait que plusieurs théories concernant la nature de l'électricité et les causes des phénomènes électromagnétiques soient parfois données. Dans la grande majorité des cours, l'enseignant se contente d'expliquer la théorie des deux fluides, parfois en expliquant son origine, mais sans donner d'autres hypothèses. À l'inverse, de Cavarlay donne ces hypothèses différentes, en l'occurrence : la théorie des fluides de Coulomb, la théorie du magnétisme et des courants élémentaires qui se rapporte probablement à Ampère, et la théorie des tensions au sein des diélectriques qu'on peut rapprocher de la théorie de Maxwell. Il justifie également l'utilisation de celle des deux fluides par la simplicité de l'analogie.

Parmi les autres hypothèses évoquées, l'une d'entre elles est à discuter : celle des ondulations de l'éther. Sur ce point il n'est pas évident que de Cavarlay fasse référence à la théorie des ondes électromagnétiques se propageant dans l'éther. D'un côté, ni Maxwell ni ses successeurs n'ont vraiment décrit les ondes comme des ondulations *du* fluide. La théorie des ondulations désigne en général la théorie optique de Fresnel. C'est d'ailleurs en ces termes que Maxwell, dans son mémoire *On Physical Lines of Force*, évoque cette hypothèse due

28. Aubusson de Cavarlay 1894, p. 3. Les caractères gras et le soulignage sont d'origine. Les italiques sont nôtres.

à Fresnel au début de son travail, lorsqu'il discute de l'état mécanique d'un milieu soumis à la propagation de l'induction électrique ou magnétique.²⁹ D'un autre côté, de Cavarlay semble décrire cette théorie des ondulations comme la plus prometteuse pour la description des phénomènes électromagnétiques, il est donc difficile d'affirmer que c'est de cette même hypothèse optique dont il parle. De plus, en cette année 1894, les expériences de Hertz ont été largement reprises et diffusées notamment en France, en supposant l'existence d'ondes électromagnétiques. il peut donc s'agir d'une méprise de l'enseignant qui considère ces ondes comme des ondulations *de* l'éther.

Dans la suite, de Cavarlay rappelle comment est définie la notion de « masse électrique » ou magnétique, qui permet d'écrire la force entre deux corps comme une quantité proportionnelle aux masses de chaque corps. Il insiste également sur le fait que cette définition est arbitraire, sous-entendant la question des unités et du système (électrostatique ou électromagnétique) dans lequel ces masses ont une valeur unité. Un peu plus loin, il aborde une autre hypothèse sur la nature de l'électricité. Il introduit ce passage en parlant de l'électricité en mouvement et en soulignant l'importance « de posséder parfaitement les lois qui régissent ces actions et expliquent tout le jeu des machines électriques » :³⁰

Hypothèse des tourbillons extérieurs - On ne peut dans l'état actuel de la science définir le mécanisme des actions électromagnétiques ; mais il semble que l'on doive placer le siège de l'action magnétique des courants dans le diélectrique qui entoure le conducteur. Celui-ci, par le fait de l'action électrique entrerait dans un état de tension particulier, le courant lui-même aurait alors son siège à la surface du conducteur dans le diélectrique même, tout comme le diélectrique qui sépare l'armature d'un condensateur serait lui-même le siège de l'énergie potentielle accumulée dans ce condensateur. L'énergie s'emmagasinerait dans ces diélectriques comme un ressort comprimé ou tordu. On en viendrait à une sorte de réalisation des lignes de force que nous avons considéré dans les champs électriques et magnétiques. Mais nous n'avons pas à entrer dans ces considérations théoriques qui ont été développées dans le cours de l'École Polytechnique. Nous n'avons besoin que de connaître les actions elles-mêmes et de les mesurer.

Le paragraphe précédent pouvait, en évoquant les ondulations de l'éther, laisser planer des doutes quant à la théorie à laquelle l'enseignant faisait référence, mais les informations don-

29. Voir Maxwell 1861, part. I, p. 163.

30. Aubusson de Cavarlay 1894, p. 39. Les caractères gras et le soulignage sont d'Aubusson de Cavarlay.

nées dans celui-ci ne laisse guère d'hésitations. L'omniprésence de la notion de diélectrique, de « l'état de tension » dans lequel il se trouve, et de l'énergie accumulée dans l'espace à l'extérieur des conducteurs désignent suffisamment la théorie de Maxwell. Si on peut faire plusieurs remarques concernant ces propos, il paraît nécessaire d'en préciser auparavant le contexte.

Ce cours est donné en 1894, soit six ans après les premières expériences de Hertz (juillet 1888), et quatre ans après la publication du cours de Poincaré sur la théorie de Maxwell (voir 11.2). De Cavarlay, s'il n'a pas publié d'articles dans les différentes revues scientifiques, se tient probablement au courant des avancées qu'il qualifie lui-même de « théoriques », ne serait-ce que pour le cours qu'il donne. Enfin, on peut remarquer qu'il connaît le programme du cours donné à cette époque à Polytechnique, puisque l'enseignement de ces notions n'a été introduit par Potier qu'en 1892, soit après que de Cavarlay est passé à Polytechnique. Lorsqu'il parle de notions déjà développées à Polytechnique, c'est donc au « nouveau » cours de Potier qu'il fait référence. Nuançons quand même le commentaire qu'il en fait, car il surestime largement les informations données sur la théorie de Maxwell à Polytechnique, dont nous avons montré dans le chapitre précédent qu'elles étaient très réduites.³¹

Ces précisions apportées, on peut faire certaines remarques. Tout d'abord, il est étonnant que de Cavarlay ne cite ni Maxwell, dont il connaît au moins l'œuvre principale, ni aucun de ses « successeurs », alors que plusieurs articles évoquent à ce moment les noms de Hertz pour ses expériences et de FitzGerald ou Lodge en Angleterre. Concernant le fait que ces notions aient déjà été abordées à l'École Polytechnique (même en partie), cela illustre le rôle de formation théorique de celle-ci. On retrouve la même logique de séparation que chez Alheilig, à savoir que les « considérations théoriques » n'ont pas à être abordées dans une école d'application.

Le dernier point, et non des moindres, est l'originalité de l'exposé d'Aubusson de Cavarlay. Rappelons que c'est lui qui, en 1903, se plaindra de l'absence de notions « étrangères » dans les raisonnements pratiques.³² Manifestement, il conserve le même état d'esprit sur les notions théoriques puisqu'il évoque toutes les théories en rapport avec l'électromagnétisme, quelque soit leur origine.

Le dernier cours que nous pouvons brièvement introduire est celui donné par Henri Royer en 1907 au sein de cette même école. Bien que le cours en lui-même soit plus tardif, et ne traite

31. L'analogie avec le ressort n'est pas donnée textuellement dans le cours de Potier de 1893, mais elle l'est dans le cours de Becquerel à partir de 1895, qui est une version très proche de celle de son prédécesseur.

32. Voir chapitre précédent p. 186.

presque pas des théories sur la nature de l'électricité ou des phénomènes électromagnétiques, il permet de mettre en avant les disparités qui peuvent exister entre plusieurs enseignants. Son cours d'électricité est, dans le contenu, assez éloigné de celui d'Aubusson de Cavarlay, bien que les deux tables des matières soient très semblables. La nature et les propriétés de l'électricité y sont beaucoup moins développées, mais on trouve un passage la notion de milieu intermédiaire dans la partie sur l'électromagnétisme.

Ainsi, dans un paragraphe intitulé « Milieu propageant les actions électriques », Royer explique :³³

La propriété essentielle des phénomènes électriques est l'action mécanique subie par les corps électrisés, manifestée à la surface d'un conducteur par la pression électrostatique. Suivant les idées de Faraday opposées aux actions à distance, cette pression nécessite une réaction équivalente, c'est-à-dire une traction, sur un milieu contigu de nature spéciale, qui existerait même dans le vide barométrique. La matière des corps conducteurs et celle des diélectriques en modifient les propriétés dans les sens différents indiqués par l'expérience. Cette hypothèse admise, la tension du milieu en question peut se calculer facilement [...].

Ce qu'il illustre par un calcul de tension au sein d'un milieu élastique, avant de poursuivre :³⁴

La théorie précédente, développée par Maxwell, l'a conduit à attribuer au milieu propageateur les mêmes propriétés qu'à l'éther imaginé pour la propagation de la lumière. [...] Suivant Maxwell, la mise en tension de l'éther qui est liée à la formation d'un champ est toujours accompagnée de la polarisation des corps matériels dans les régions occupés par ceux-ci.

Royer donne deux preuves en faveur de la théorie de Maxwell, à savoir l'égalité de la vitesse de la lumière et « celle de l'électricité », et l'égalité de l'indice de réfraction théorique d'un diélectrique $\sqrt{\epsilon}$ et de n (la relation de Maxwell). Il mentionne ensuite rapidement les deux cas conducteurs et diélectriques, avec les termes de « courant de conduction » et « courant de déplacement » qui apparaissent, sans être détaillés.

En comparant ces trois cours d'électricité, donnés dans la même école, et par des enseignants ayant eu tous les trois à peu près la même formation, on constate donc des disparités

33. Royer 1907, p. 43.

34. *Ibid.*, p. 43-4.

conséquentes sur le seul domaine des théories portant sur la nature de l'électricité ou des phénomènes électromagnétiques. Bien que les trois cours n'aient que quelques années d'intervalle, et soient tous trois successifs à l'émergence de la théorie de Maxwell avec les expériences de Hertz, ils n'en restent pas moins bien différents. Deux facteurs sont à nos yeux susceptibles d'expliquer ces divergences. D'une part, comme dans tout cours donné dans les écoles supérieures, où une grande liberté est laissée au professeur, on peut arguer de la volonté de l'enseignant de développer plus ou moins certaines notions. D'autre part, le cadre théorique de ces cours évolue de façon extrêmement rapide et cette évolution a — pour un scientifique qui s'informe régulièrement — des conséquences sur ses choix pédagogiques. Dans les cours de physique de Polytechnique il était possible de trouver des différences, mais elles étaient plutôt dues à une évolution de la connaissance dans le domaine en question, se complétant au fur et à mesure, qu'à de véritables choix pédagogiques. Dans les écoles d'application, les notions enseignées dépendent beaucoup plus largement du professeur.

Les ressources accessibles

En plus des cours donnés par les enseignants, les élèves ont accès à d'autres supports dans le cadre de leur formation à l'école, en premier lieu par la bibliothèque. On peut prendre pour exemple la bibliothèque de l'École de Mines, qui présente en 1900 un catalogue pouvant préciser tous les aspects de l'éther.³⁵ En optique tout d'abord, la bibliothèque dispose des références « classiques » : l'*Optics* de Newton, des mémoires d'Arago, de Biot, de Fresnel ainsi que les *Œuvres complètes* de ce dernier. Parmi les ouvrages plus récents, le *Traité d'Optique* de Mascart (paru en 1889 pour le premier volume). En spectroscopie on trouve également un mémoire de Michelson, « On the application of interference methods to spectroscopic measurements » (1892).³⁶

Dans la catégorie « Physique » on trouve surtout les cours donnés à Polytechnique : les cours de Jamin (de 1866 à 1883), Potier (de 1883 à 1889), Cornu (de 1886 à 1893) et Verdet (de 1869 et de 1872) sont référencés, mais celui de Becquerel n'est pas présent, peut-être trop récent. Les principaux noms des théories électromagnétiques et leurs références sont peu présents : dans l'index Lorentz ou Larmor ne sont pas mentionnés ; Poincaré n'est référencé que pour son cours de Thermodynamique (1892) ce qui a de quoi surprendre car ses premiers cours sur l'électromagnétisme, publiés en 1890, sont antérieurs à celui de Thermodynamique ;

35. ENSMP 1900.

36. *Ibid.*, p. 110.

W. Thomson pour un mémoire de mathématiques ; et Faraday pour ses travaux en chimie (l'ouvrage *Manipulations chimiques*, dont la traduction a été publiée en 1827).

Seul le *Traité* de Maxwell apparaît, dans la catégorie « Traités généraux d'électricité », en compagnie des cours d'Éric Gérard (voir chapitre suivant) et des cours d'Alheilig et Aubusson de Cavarlay donnés à l'École du Génie Maritime. Parmi les mémoires relatifs à l'électricité, certains portent notamment sur la propagation des ondes électromagnétiques : un mémoire d'Édouard Sarasin et Lucien de la Rive « Sur la résonance multiple des ondulations électriques de M. Hertz se propageant le long des fils conducteurs » (1890),³⁷ auquel on peut ajouter également la présentation faite à la Société Française de Physique le 7 mars 1890 ; les mémoires originaux de Hertz sur ses expériences ne sont pas présents, mais on trouve ses « Études sur la diffusion de l'énergie électrique » de 1892 ;³⁸ enfin on trouve le mémoire de René Blondlot sur la « détermination expérimentale de la vitesse de propagation des ondes électro-magnétiques » de 1892.³⁹ À ces mémoires s'ajoutent des publications périodiques dédiées à l'électricité : le *Bulletin de la SIE* depuis sa création (voir 9.3), le journal *La Lumière Électrique/L'Éclairage Électrique* à partir de 1879,⁴⁰ l'autre grande revue française spécialisée *L'Électricien* à partir de 1891, ou la revue allemande *Fortschritte der Elektrotechnik* à partir de 1887.

7.4 Une position ambiguë

La façon dont les enseignants présentent les phénomènes électriques aux élèves se modifie peu à peu. Certains concepts comme les lignes de force font leur apparition, notamment dans la description des lois du magnétisme. Mais nous allons montrer que c'est surtout l'aspect pratique qui est utilisé, et doit toujours coexister avec les notions récurrentes de la physique française. Pour cela, nous prendrons comme exemple un extrait du « Cours d'électricité industrielle » donné par Potier à l'École des Mines lors de l'année 1900-1901, rédigé par ses étudiants.⁴¹

37. *Ibid.*, p. 118.

38. « *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft* » (*Ibid.*, p. 117). Notons que ce mémoire apparaît en langue originale

39. *Ibid.*, p. 116.

40. Rappelons que le journal *La Lumière Électrique* est créé en 1879, et change de nom en 1894 pour devenir l'*Éclairage Électrique*.

41. Potier 1900.

La subsistance du magnétisme classique

La première partie du cours aborde des « considérations générales » sur l'électricité. La description est faite en termes de courants et de tension, sans présenter d'hypothèses sur la nature fondamentale. Le cours débute d'ailleurs directement par la distinction entre générateurs et récepteurs. Après ces premières considérations, Potier aborde la partie sur le magnétisme. Il donne dès le début la définition du champ magnétique, définition indirecte du champ puisque qu'elle pose qu' « une aiguille aimantée subit dans un champ magnétique une action directrice ». La distinction est toujours faite entre le champ et ses caractéristiques, Potier précisant qu' « un champ est défini si on donne en chaque point la valeur et la direction de l'intensité ». ⁴² Dans toute la suite, il utilisera uniquement les termes d' « intensité » ou de « force » pour désigner la grandeur, le terme de « champ » étant utilisé pour désigner la région de l'espace. C'est un point que d'autres enseignants, comme Éric Gérard dans ses cours, ne respecteront pas toujours (voir chapitre suivant).

Potier décrit tout d'abord le comportement d'un moment magnétique, mais plusieurs imprécisions sont à relever dans les éléments qu'il donne. Dans un premier temps il considère un moment magnétique \mathbf{M} qui serait soumis à une force magnétique extérieure \mathbf{H} . Il pose ce qu'il présente comme la force (mécanique) subie par l'aimant, égale au produit de ces deux quantités et du sinus de l'angle entre les deux : $HM\sin(\mathbf{H}, \mathbf{M})$ — ce qui correspond au produit vectoriel actuel. Cette expression prête à confusion : la force subie par un moment dans un champ magnétique se calcule en dérivant l'énergie potentielle $-\mathbf{M}\cdot\mathbf{B}$, et a une expression plus compliquée. L'expression $\mathbf{M} \times \mathbf{B}$ est celle du couple. Nous supposons que c'est cette grandeur que Potier a voulu définir.

Il donne ensuite l'expression de la force magnétique créée par l'aimant, de la forme $H = \frac{M}{\mu_0 r^3}$ où il définit μ_0 comme « une constante que nous avons le droit de choisir puisque nous ne connaissons par la nature intime de H et de M », ⁴³ ainsi que l'expression du couple exercé par un moment magnétique sur un autre, $C = MH' = \frac{MM'}{\mu_0 r^3}$ (à ce niveau Potier évoque bien le *couple* et non la *force* d'un aimant sur un autre, mais n'introduit pas d'angle entre les deux).

La loi de Coulomb pour le magnétisme, posant les actions réciproques des masses magnétiques avec une dépendance en $1/r^2$ est donnée de façon presque indicative. De la même façon, l'hypothèse des fluides magnétiques, que Potier discute largement dans son cours à

42. Potier 1900, p. 107.

43. *Ibid.*, p. 108.

Polytechnique, n'est ici que mentionnée :⁴⁴

Si on imagine deux fluides + et - dont les molécules s'attirent suivant la formule mm'/r^2 , on retrouve les phénomènes indiqués par l'expérience. On a tiré de cette loi simple beaucoup de conséquences qui ont été vérifiées mais bien d'autres théories pourraient aussi expliquer ces phénomènes.

Concernant les « autres théories » en question qui pourraient expliquer ces phénomènes, il ne mentionne aucune d'entre elles.

Dans le paragraphe suivant, Potier traite des « Conséquences de la loi de Coulomb ». Il commence par définir la force mécanique exercée sur une masse magnétique m par une intensité \mathbf{H} , force dont l'expression est $\mathbf{F} = m\mathbf{H}$. Il prend le cas particulier d'une masse déplacée le long d'une trajectoire fermée (qui revient donc à son point de départ). Il justifie la nullité du travail total en arguant que « la masse est revenue à son point de départ et qu'il s'agit de forces centrales fonctions seulement des distances » ; en prenant $m = 1$ cela lui permet de poser que la quantité $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$ (circulation de l'intensité) est nulle.⁴⁵

Plusieurs éléments interrogent sur les notions que Potier veut faire intervenir, dans un cours d'électricité qui date pourtant de 1900. Tout d'abord, concernant la définition du moment magnétique, l'imprécision entre force et couple est surprenante. Dans le cours de Polytechnique le couple magnétique $\mathbf{H} \wedge \mathbf{M}$ est défini, et il est bien précisé qu'il s'agit d'un couple, et non d'une force.⁴⁶ Ensuite l'utilisation du concept de « masse magnétique » est caractéristique de l'utilisation de concepts anciens. Outre le terme en lui-même hérité de la théorie des fluides, l'expression de la force (mécanique) comme proportionnelle à l'intensité magnétique renvoie directement à la théorie de Coulomb. Elle pose naturellement la question de la définition d'une masse magnétique chez Potier, qui considère les fluides magnétiques comme inexistantes (voir 6.2), et renvoie au problème de l'existence de magnétisme isolé (en termes anachroniques : les monopôles magnétiques). D'ailleurs cette utilisation est relativement courte, puisque le but de Potier est d'établir que la circulation de l'intensité \mathbf{H} sur un contour fermé est nulle, et il prend $m = 1$. Or si l'on reprend le cours de Polytechnique se rapportant à la théorie électromagnétique de la lumière, on trouve l'équation de Maxwell

44. *Ibid.*

45. *Ibid.*, p. 109

46. Sauf précision, le cours auquel nous nous référons dans cette partie est le cours de Becquerel de l'année 1897-98, que les anciens élèves de Polytechnique qui sont aux Mines en 1900 ont suivi. Becquerel 1897, p. 109-10

reliant courant et intensité magnétique qui, en l'absence de courants, donne $\nabla \wedge \mathbf{H} = 0$, à partir duquel la nullité de la circulation se déduit aisément.⁴⁷

En faisant appel à la théorie de Maxwell, Potier pourrait donc obtenir très rapidement la relation qu'il cherche. Dans ces premiers paragraphes, les raisonnements font appel à des concepts coulombiens, et Potier semble ne pas utiliser les connaissances déjà acquises par les élèves, au moins ceux sortant de Polytechnique (rappelons que seule une minorité provient de l'X, les autres élèves peuvent avoir des connaissances plus que partielles sur la théorie de Maxwell).

La nullité du travail permet à Potier de poser que la circulation de l'intensité magnétique le long d'une courbe fermée est nulle (en prenant la masse magnétique égale à l'unité) : $\oint H_l dl = 0$. Le flux de force est défini comme le produit scalaire de l'intensité sur la normale à une surface : $\int H_n dS$.⁴⁸ Potier précise que le flux à travers une surface quelconque est non nul, et qu'il le devient dans le cas d'une surface fermée. Pour illustrer le principe de conservation du flux, il utilise l'analogie du fluide incompressible, en considérant les quantités de liquide entrant et sortant d'une surface donnée.

Introduction des lignes de force

L'utilisation de cette analogie à cet endroit précis n'est probablement pas fortuite, car Potier — bien qu'il ne fasse pas le lien entre les deux — enchaîne sur la définition d'une ligne de force, comme « la ligne partant d'un point du champ et tangente en tout point à l'intensité », en précisant que c'est « la trajectoire d'une masse magnétique abandonnée à elle-même dans le champ ». De la même façon, il donne la définition d'un tube de force comme « la surface formée par les lignes de force partant des différents points d'un contour quelconque ». Potier applique directement le théorème du flux au tube de force, en considérant la surface constituée d'un tube de force et de deux surfaces aux extrémités. L'intensité étant tangente en tout point à la surface latérale (par définition de la ligne de force), le flux à travers celle-ci est nul. Il en résulte que le flux entrant est égal au flux sortant. Une fois encore, Potier utilise la comparaison avec un fluide : « Ce fait est comparable à l'écoulement d'un liquide dans un tube ; la masse d'eau qui traverse une section du tube dans l'unité de temps est la même

47. Becquerel 1897, p. 518. La relation formelle est donnée par le théorème de Stokes.

48. *Ibid.*, p. 110. La notation H_l désignent la composante parallèle à l'élément de contour dl . De même, H_n est la composante normale à la surface. Dans la rédaction du cours on trouve directement $\int H_n d\sigma = 0$, ce qui est très probablement une erreur étant donné qu'aucune caractéristique de la surface n'est mentionnée à ce moment.

quelque soit cette section ». Il retrouve le résultat analogue à la conservation du débit : le flux — c'est-à-dire la quantité $\mathbf{H} \cdot \mathbf{S}$ — étant constant, l'intensité du champ est inversement proportionnelle à la surface.⁴⁹

L'utilisation que fait Potier des lignes de force est en réalité très restreinte. Il définit d'abord les surfaces équipotentielles comme étant perpendiculaires aux dites lignes. La démonstration de Potier peut se résumer comme suit (voir schéma 7.2) : soient un point M et un point N_1 situés sur la même ligne de force ; prenons un point N_2 infiniment voisin de N_1 et tel que la quantité $\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$ (la circulation) soit la même sur les chemins MN_1 et MN_2 . En calculant la circulation totale sur le chemin MN_1N_2 , les deux termes sur MN_1 et N_2M s'annulent (Potier précise bien qu'ils sont de signe opposé). Le terme $\mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$ est nul sur la portion N_1N_2 , donc \mathbf{H} est perpendiculaire à ce trajet. L'ensemble des points N_2 définit ainsi une surface perpendiculaire aux lignes de force, appelée surface équipotentielle.⁵⁰

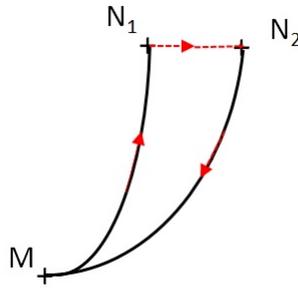


FIGURE 7.2 – Schéma de la démonstration des surfaces équipotentielles. N_1 et N_2 sont infiniment proches, les lignes de force partant de M sont représentées en noir, le contour d'intégration en rouge.

Après avoir abordé ces points, Potier s'intéresse à l'« aimantation du fer doux » pour laquelle il donne plusieurs hypothèses.⁵¹ La première est celle de Coulomb qui « suppose qu'il y a dans le fer deux fluides qui se séparent sous l'action du champ ce qui donne au fer toutes les propriétés d'un aimant ». La deuxième est celle de Poisson pour qui « chaque partie d'un morceau de fer acquiert la propriété de s'aimanter », et le calcul de cette aimantation induite permet à Potier d'introduire la distinction entre l'intensité \mathbf{H} et l'induction \mathbf{B} . Il montre

49. *Ibid.*, p. 110-1.

50. Cette démonstration est très similaire à celle enseignée de nos jours, à l'exception de l'utilisation de l'opérateur vectoriel gradient.

51. Le fer doux présente une aimantation induite en présence d'un champ magnétique extérieur mais une aimantation rémanente négligeable.

ainsi que le théorème du flux ne s'applique plus à \mathbf{H} mais à la quantité $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ (où μ est la perméabilité magnétique) soit $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$ à travers une surface fermée.⁵²

La dernière question est celle de la « réfraction des lignes de force » à l'interface entre l'air et le fer. Potier démontre dans un premier temps les conditions aux limites pour les grandeurs magnétiques. Reprenons son raisonnement dans le cas général d'une interface milieu 1—milieu 2, et considérons un contour infinitésimal $abcd$ (voir schéma 7.3). La première relation est obtenue en calculant la circulation de \mathbf{H} sur le contour, dans le sens $abcd$ et en négligeant les contours bc et da (infiniment petits), ce qui donne : $\int_a^b \mathbf{H}_1 \cdot d\mathbf{l} + \int_c^d \mathbf{H}_2 \cdot d\mathbf{l} = 0$, soit avec nos conventions $-H_1 \sin(\theta_1)ab + H_2 \sin(\theta_2)cd = 0$, d'où $H_1 \sin(\theta_1) = H_2 \sin(\theta_2)$.

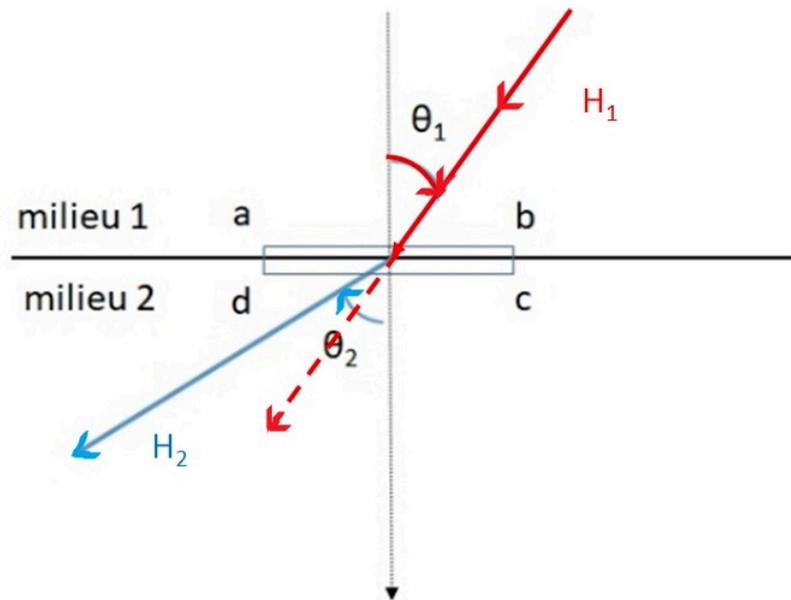


FIGURE 7.3 – Schéma de la réfraction des lignes de force magnétique à l'interface entre deux milieux. Le sens de la ligne de force est indiqué par la flèche (Potier oriente l'intensité H_1 dans l'autre direction).

Remarquons que Potier commet une erreur assez grossière sur le calcul de la circulation de l'intensité \mathbf{H} : d'une part, dans le milieu 1 il oriente la ligne de force (donc l'intensité) vers l'extérieur, et non vers l'interface. La circulation sur la portion ab vaut alors $+H_1 \sin(\theta_1)ab$, ce qui devrait impliquer une erreur de signe sur la relation finale. Mais dans le calcul de la circulation, Potier égalise les deux circulation sur ab et sur cd , ce qui revient à dire $\int_a^b \mathbf{H}_1 \cdot d\mathbf{l} = \int_c^d \mathbf{H}_2 \cdot d\mathbf{l}$. Les deux erreurs se compensant, Potier retrouve la relation correcte. Cette erreur manifeste est surprenante, d'autant que plus haut dans la démonstration

52. *Ibid.*, p.112-5.

des surfaces équipotentiellles, il avait prêté attention à l'orientation du contour dans le calcul. Veut-il retrouver rapidement la relation qu'il sait correcte? Ou est-ce une « vraie » erreur de raisonnement qui est compensée par l'orientation de la ligne de force? Notons que pour cette dernière, le bénéfice du doute peut être laissé à Potier qui n'oriente pas les angles θ_1 et θ_2 , ce qui laisse une incertitude sur le signe du sinus. L'autre possibilité est une erreur des élèves « copistes » qui auraient rédigé le cours après coup, et n'auraient pu retrouver la relation correcte sans utiliser cette voie détournée.⁵³

Une seconde relation est obtenue en appliquant le théorème du flux. Potier considère une surface fermée formée par la révolution du contour $abcd$ autour de l'axe (la surface ainsi formée peut être désignée par le nom très (peu) scientifique de « boîte de camembert »). Il applique le théorème du flux à l'induction \mathbf{B} , ce qui amène à $B_1 \cos(\theta_1) = B_2 \cos(\theta_2)$. Remarquons qu'une erreur est également commise sur l'application du théorème, puisqu'en orientant les lignes de force vers l'extérieur, Potier aurait dû obtenir l'expression $B_1 \cos(\theta_1) + B_2 \cos(\theta_2) = 0$. Si l'orientation approximative des angles pouvait laisser le bénéfice du doute à Potier lorsque les *sinus* interviennent, il n'en est pas de même avec les *cosinus*, la fonction étant paire. Encore une fois, il est difficile d'attribuer cette erreur à Potier ou aux élèves qui ont rédigé le cours, mais cette double erreur sur l'utilisation des théorèmes mathématiques peut refléter un traitement superficiel des concepts de flux et de lignes de force.

En reprenant la relation entre l'induction \mathbf{B} et l'intensité \mathbf{H} , soit $\mathbf{B}_i = \mu_i \mathbf{H}_i$, on obtient $\frac{1}{\mu_1} \tan(\theta_1) = \frac{1}{\mu_2} \tan(\theta_2)$. Cette relation illustre la propension des lignes de force à s'écarter de la normale lorsqu'elles entrent dans un milieu plus « réfringent », avec une perméabilité magnétique plus élevée ($\mu_1 < \mu_2$). Enfin, Potier livre une dernière conception concernant l'aimantation du fer, qui est celle de Faraday. Selon le britannique, nous dit Potier, le fer aurait « la propriété d'être plus facilement traversé que l'air par les lignes de force », il est « plus perméable ». En conséquence, le fer « concentre les lignes de force, donc celles-ci s'élargissent d'avantage à côté et la force magnétique augmente dans le voisinage du fer ».⁵⁴

La question soulevée par la réfraction des lignes de force se rattache intuitivement au problème des transformateurs. Pourtant, dans la suite du cours, Potier n'utilise plus la notion de lignes de force, et il ne se réfère qu'une seule fois à Faraday. Lorsqu'il aborde le calcul de l'énergie d'un système de courants, Potier montre que l'énergie magnétique de ce système, qui vaut $\frac{1}{2} \sum I_p \Phi_p$ (où I_p et Φ_p sont respectivement l'intensité et le flux magnétique dans le circuit p) est aussi égale à la quantité $\frac{1}{8\pi} \int BHdV$, qui « dans la théorie de Faraday Maxwell,

53. *Ibid.*, p. 115-6.

54. *Ibid.*, p. 116.

représente l'énergie du champ ». ⁵⁵ Dans la suite du cours, Potier parle de la « loi d'induction » reliant la force électromotrice et le flux $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ sans mentionner Faraday. De la même façon, le traitement des transformateurs se fait sans considérer les lignes de force, et Potier emploie surtout la notion de flux embrassé, bien que le principe même du noyau de fer dans le transformateur s'explique simplement avec ce concept.

Conclusion

La présence des théories électromagnétiques ou de l'éther dans les écoles d'application doit avant tout être abordée en considérant une limite bien définie : les notions théoriques restent à Polytechnique, et les écoles d'application se concentrent sur les notions pratiques. Mais si cette séparation est bien acceptée de part et d'autre, l'arrivée progressive de l'électricité dans les programmes des écoles change légèrement la donne. Cette entrée est relativement tardive, puisqu'elle se place au milieu des années 1880, et nous verrons dans le chapitre suivant que plusieurs établissements consacrés à l'électricité ont déjà été créés à cette période. D'autre part, cette arrivée, toujours justifiée par une importance croissante de la place de l'électricité dans l'industrie, entraîne la création de cours qui intègrent une partie de rappel sur les notions théoriques.

Le contenu de ces parties de rappel dépend largement de l'enseignant, mais une étude attentive montre que certaines notions nouvelles comme les idées de Maxwell, en particulier sur le milieu de propagation, peuvent faire leur apparition. Toutefois, ces idées restent souvent désignées comme des hypothèses. L'« éther » n'est pas toujours mentionné, mais la question du milieu est souvent traitée, et elle est bien présentée comme différente des hypothèses sur les fluides électriques, qui tiennent toujours une place importante. De la même façon, l'apparition de ces nouvelles notions se fait parfois en parallèle de l'utilisation de concepts plus anciens comme les actions à distance.

55. Potier 1900, p. 22 bis (dans l'édition consultée un problème de pagination fait recommencer la numérotation à la page 1 après la page 116. La page « 22 bis » désigne la page 22 prise à partir de la nouvelle numérotation).

— Je suis venu en quête de
conseils.
— C'est facile.
— Et d'aide.
— Ce n'est pas toujours aussi
facile.

Arthur C. Doyle

Chapitre 8

Les établissements civils et la diversité des enseignements

En dehors du cercle restreint des écoles d'applications, un ensemble d'établissements s'ouvre peu à peu à la nouvelle voie de l'enseignement de l'électricité. Sous l'impulsion de différents acteurs, certains établissements sont créés dans l'optique de fournir une nouvelle voie de formation consacrée à l'industrie en général, comme l'École de Physique et Chimie Industrielle, créée par la municipalité de Paris. D'autres sont tournés exclusivement vers l'électricité, comme la nouvelle École Supérieure d'Électricité, issue du Laboratoire Central d'Électricité, ou les instituts électrotechniques, qui apparaissent au sein de plusieurs universités, dont Lille et Nancy.

À l'image des écoles d'applications de Polytechnique, les établissements plus anciens mettent du temps à apprivoiser l'électricité. Parmi eux, l'École Centrale des Arts et Manufactures est la première à attribuer une place de plus en plus importante à cette branche émergente. La jeune École Supérieure de Télégraphie enseigne rapidement la théorie de Maxwell, comprenant tout l'intérêt pour son domaine des expériences de Hertz notamment. Enfin, le Conservatoire des Arts et Métiers, fidèle à sa tradition des sciences appliquées, prend un nouveau virage avec la création d'une chaire d'électricité industrielle en 1890. Dans tous ces établissements, l'approche de l'électromagnétisme reflète souvent la visée de formation de l'école ou de l'institut.

8.1 L'électricité ouvre de nouvelles voies

Les années 1880 sont marquées par l'apparition d'établissements qui se démarquent des grandes écoles « à la française », réservées aux étudiants du système secondaire. Les nouveaux venus innovent notamment par leur approche, faisant la part belle aux théories nouvelles, et qui rompt avec les lourdes traditions des écoles plus anciennes. Les élèves sortant de l'École de Physique et Chimie Industrielle ou de l'institut Montefiore de Liège ont ainsi une connaissance assez large des conceptions de Maxwell et du rôle de l'éther en électromagnétisme.

À l'école de la ville

Des formations d'ingénieur pour les élèves du système primaire se mettent en place, à l'image de l'École Municipale de Physique et Chimie Industrielles (abrév. EMPCI), créée en 1882 à Paris. Comme le signale le spécialiste de l'enseignement supérieur et géographe Paul Melon dans son rapport à propos de l'EMPCI :¹

Cette École est destinée à servir de complément aux écoles d'enseignement primaire supérieur et à fournir aux jeunes gens, sortant de ces écoles, les moyens d'acquérir des connaissances scientifiques spéciales qui leur permettent d'occuper, dans l'industrie privée, des emplois d'ingénieurs, de chimistes ou de chefs d'atelier.

Les élèves sortant de l'EMPCI ne bénéficient pas du statut d'ingénieur des corps de l'État des polytechniciens, ni de la renommée d'une école comme Centrale. Il est donc peu probable qu'ils aient accès aux mêmes fonctions qu'eux. Dans la suite, nous considérerons que le statut d'un diplômé de l'EMPCI est celui d'un « technicien supérieur », qualifié dans un domaine particulier, sans pouvoir se prévaloir d'une compétence de direction.

L'effectif est de 30 élèves par an, ce qui constitue une promotion assez restreinte. À l'inverse d'écoles généralistes, comme Centrale, qui proposent souvent un enseignement très varié, les cours à l'EMPCI sont uniquement dédiés aux sciences, en accord avec la vocation première de l'établissement. Les seules matières enseignées sont les mathématiques, et les diverses branches de la physique et de la chimie. Les élèves suivent une première année de tronc commun, avant de choisir une spécialité entre la physique et la chimie.²

Le cours de physique est professé par Édouard Hospitalier, que nous avons largement

1. Melon 1891, p. 26.

2. Conseil Municipal de Paris 1882, p. 4.

évoqué pour sa participation à l'Exposition de 1881, notamment en tant que conférencier, et que nous retrouverons dans notre troisième partie. Hospitalier publie en 1890 un *Traité de l'énergie électrique*, qu'il souhaite orienter à mi-chemin entre les « livres de science pure » qui sont d'après lui « écrits avec une préoccupation insuffisante des applications auxquelles la théorie peut donner lieu », et les « traités industriels », qui ne tiennent au contraire pas assez compte des aspects théoriques. Il souligne également que c'est « dans le même esprit » qu'il professe son cours à l'EMPCI.³

Dans le dernier chapitre de son cours, dédié aux « Questions diverses », Hospitalier aborde par exemple les machines électrostatiques ou la piézoélectricité.⁴ Il traite surtout des phénomènes électro-optiques, qui sont en général absents des traités d'électricité à cette époque. Le premier effet qu'il développe est l'effet Faraday. En particulier, il donne la loi de Verdet, qui établit la proportionnalité entre l'angle de rotation et l'intensité du champ magnétique.⁵ Il aborde également les travaux de Potier sur la question de l'effet Faraday.⁶

Hormis ce point, Hospitalier développe très largement les expériences de Hertz — qui sont alors très récentes, le cours étant publié en 1890. Il donne tout d'abord les enjeux des recherches du scientifique allemand :⁷

Ces expériences ont pour but principal d'apporter une confirmation expérimentale aux vues de Faraday et de Maxwell sur la propagation des actions électromagnétiques, et la parfaite identité des ondulations électriques et lumineuses, ondulations qui ne diffèrent entre elles que par leurs amplitudes et leurs fréquences.

Hospitalier étudie ensuite le dispositif de Hertz. Sur la version qu'il décrit, la charge se fait toujours par une bobine de Ruhmkorff, mais deux sphères sont utilisées au lieu de plaques (voir la figure 8.1). Comme le souligne l'enseignant, « la capacité approximative de ce système peut se calculer par le diamètre des sphères », ⁸ et le coefficient d'induction peut être modifié

3. Hospitalier 1890, p. V.

4. Sur le sujet de la piézoélectricité, Hospitalier évoque notamment le rôle des frères Curie, Jacques et Pierre, qui ont découvert ce phénomène en 1880. Hospitalier est parfaitement au courant de cette découverte, puisque lorsqu'il rédige son cours Pierre Curie est chef de travaux à l'EMPCI. Sur la découverte de l'effet piézoélectrique voir Katzir 2003.

5. La loi de Verdet, obtenue expérimentalement, établit la relation : $\theta = a l H \cos \beta$, où l est la longueur traversée par le rayon dans le milieu magnétique, $H \cos \beta$ la composante du champ magnétique selon le rayon, et a la *constante de Verdet*, dépendant du milieu, positive pour les corps diamagnétiques, négative pour les corps paramagnétiques.

6. Hospitalier 1890, p. 581-3. Dans des exposés à l'Académie des Sciences, Alfred Potier propose une explication pour l'effet Faraday. Voir *CRAS*, séance du 11 mars 1889 (Potier 1889).

7. Hospitalier 1890, p. 584.

8. *Ibid.*, p. 585.

en faisant varier la position des sphères par rapport aux pointes entre lesquelles se déclenche l'étincelle. La seule formule qui apparaît est celle donnant la période des oscillations en fonction de ces deux caractéristiques,⁹ et Hospitalier souligne l'importance — et la difficulté — d'arriver à des oscillations de période suffisamment faible (hautes fréquences). D'autre part, il décrit les deux effets détectables — action électromagnétique et action électrostatique — en se basant sur les lignes de force :¹⁰

Les lignes de force électrostatiques se trouvent toutes dans des plans qui passent par les centres des deux boules A et B et vont de l'une à l'autre. Au contraire, les lignes de force électromagnétiques sont dans des plans normaux aux précédents et sont concentriques aux tiges t, t' , au moins pour la partie centrale de l'excitateur.

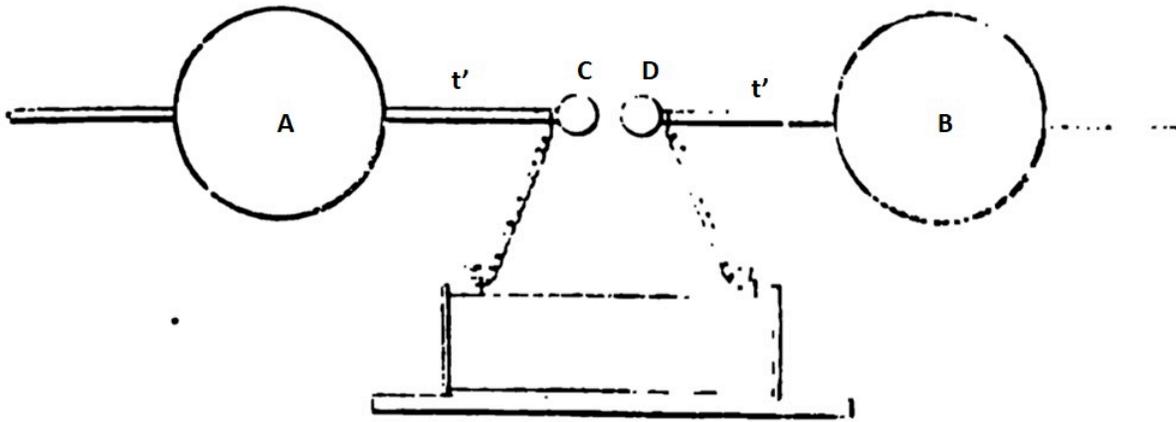


FIGURE 8.1 – Dessin partiel du dispositif de Hertz pour les oscillations électriques (voir aussi schéma p. 103). Hospitalier a représenté le dispositif avec les boules formant le condensateur plutôt que les plaques. Hertz a utilisé les deux systèmes. (Tiré de Hospitalier 1890, p. 585).

Concernant la détection des effets, Hospitalier parle du rôle du circuit secondaire, « composé d'un fil métallique recourbé sur lui-même circulairement ». Point intéressant, il compare les résultats obtenus avec les expériences réalisées par Ferdinand de Nerville et Jules Joubert au Laboratoire Central d'Électricité, utilisant un circuit résonateur plus précis (tubes de verre pour isoler les pointes, maintenues par une pièce de bois, plaques d'étain pour augmenter la capacité, tissu pour cacher la lumière de l'étincelle primaire). Ces expériences ont été réalisées devant la Société Française de Physique en mai 1889, elles sont donc particulièrement

9. La période des oscillations est $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

10. Hospitalier 1890, p. 586.

récentes. Elles n'apparaissent que rarement dans les écrits postérieurs, par rapport à celles de Sarasin et de la Rive ou celles de Blondlot, beaucoup plus discutées. Hospitalier conclut en disant que « les résultats indiquent que les radiations électriques se comportent absolument comme la lumière au point de vue qualitatif ». ¹¹

À la suite des travaux de Hertz, Hospitalier décrit également une autre série d'expériences sur la production d'ondes électromagnétiques. Il s'agit des expériences réalisées par Oliver Lodge sur les oscillations de grande période, et qui sont en lien direct avec celles de son confrère allemand. D'après Hospitalier, « le point de départ commun est la conception d'un milieu soumis à des tensions et à des ondulations dont nous n'observons que la résultante ». ¹² Il conclut sur ces différentes expériences en mettant en avant le rôle du milieu intermédiaire : ¹³

Toutes ces expériences et un grand nombre d'autres que nous pourrions citer tendent à confirmer l'idée émise par Faraday, établie théoriquement par Maxwell, que les phénomènes électriques, magnétiques, calorifiques et lumineux sont le résultat d'ondulations d'amplitude et de fréquence variables et variées, se transmettant à distance, avec une grande vitesse de propagation, dans tout l'univers, par l'intermédiaire d'un milieu vague infiniment subtil appelé *éther*, qui échappe encore à tous nos sens, et dont nous ne pouvons percevoir la présence que par l'imagination [...]

Le cours que Hospitalier professe dans le cadre de l'EMPCI regroupe les points les plus intéressants pour notre étude : une école issue de la dynamique autour de l'industrie — bien qu'elle ne soit pas dédiée uniquement à l'électricité — ; un enseignement à un public promis à une carrière dans l'industrie, principalement en tant que techniciens supérieurs ; une description des expériences basées sur la théorie de Maxwell, assez rapidement après leur réalisation ; et une mise en avant du milieu intermédiaire. Ces différents points montrent que l'éther est connu de certains ingénieurs ou techniciens, et que les théories électromagnétiques — au moins en ce qui concerne les principales notions — et leurs enjeux apparaissent clairement dans leurs cours.

En 1895, le cours de physique est séparé en deux parties. Hospitalier conserve la partie du cours « Électricité industrielle ». Le cours de « Physique générale et électricité théorique »

11. *Ibid.*, p. 588. Sur les expériences de Joubert et de Nerville voir : *Revue scientifique* 1889.

12. Hospitalier 1890, p. 588.

13. *Ibid.*, p. 593. Les italiques sont d'origine. La mention de « transmission à distance » doit à notre sens être comprise comme une propagation sur une certaine distance plutôt que comme une « action à distance ».

est désormais assuré par Pierre Curie, jusqu'alors chef de travaux à l'école, qui devient professeur. Dans le programme du cours de 1900, une partie du cours de deuxième année est explicitement dédiée aux « oscillations électriques », qui contient notamment la propagation des oscillations électriques et les expériences de Hertz. La théorie de la propagation des ondes électromagnétiques est vue en troisième année.¹⁴

La référence Montefiore à Liège

En 1883 un nouvel institut électrotechnique, dont il a été fait mention précédemment, ouvre ses portes à Liège. L'institut Montefiore, du nom de son mécène Georges Montefiore-Lévi, joue un rôle important dans l'émergence de l'enseignement électrotechnique supérieur en France, car il sera le modèle des futurs établissements. Comme le souligne André Grelon, c'est « l'école qui va le plus contribuer, par les conditions de sa création et son important développement, à susciter réflexions et initiatives afin d'aboutir à la création d'un haut enseignement électrotechnique français ».¹⁵

Le projet global est mis en œuvre par Éric Gérard, ingénieur belge sorti de l'École Supérieure de Télégraphie, commissaire belge à l'Exposition Internationale d'Électricité, et qui enseigne depuis 1881 l'électricité à l'École des Mines de Liège. Lorsque l'institut ouvre ses portes en octobre 1883, dix-huit élèves, dont huit étrangers, commencent à suivre les cours que Gérard donne sur l'électricité et le magnétisme. À l'image de l'établissement, ces cours serviront de référence pour les professeurs d'électricité d'autres pays, en particulier en France, comme Démétrius Monnier à l'École Centrale. Le cours est publié dès 1886 dans les *Éléments d'électrotechnique* de Gérard puis, à partir de 1890, sous le nom de *Leçons sur l'électricité professées à l'Institut électrotechnique Montefiore*.¹⁶

Nous nous contenterons de faire une analyse très rapide du cours dans son ensemble. Celui-ci est organisé en deux tomes, il aborde tous les points nécessaires à la description des phénomènes électriques et magnétiques d'un point de vue théorique au sein du premier tome, alors que le second est dédié aux applications industrielles comme les moteurs électriques, la téléphonie ou l'éclairage électrique. La reconnaissance qu'obtiendra ce cours dès sa publication est due au fait qu'il est particulièrement complet, ce qui en fait une base attrayante pour les professeurs des chaires nouvellement créées de par l'Europe. André Grelon souligne la qualité de l'ouvrage qui « représente (selon les jugements des contemporains) le manuel

14. Curie 1902, p. 31 ; Lauth 1900, p. 56.

15. Grelon 1991, p. 279.

16. Voir Gérard 1890 et 1891 pour les *Leçons*.

le plus élaboré et le plus complet du marché ». Nous développerons deux points particuliers relatifs à ce cours.¹⁷

Le premier est un chapitre intitulé « considérations générales sur la propagation des courants », dans lequel Gérard amène de façon progressive aux conceptions de Maxwell et aux expériences de Hertz, en utilisant uniquement les concepts liés à l'électricité. Ce chapitre est l'une des principales modifications dans la deuxième édition en 1891, et il apparaît avec l'ajout de plusieurs paragraphes ainsi que le nouveau titre de « Complément théorique ». C'est sur cette deuxième édition que nous basons notre étude, en précisant les ajouts le cas échéant.¹⁸

Gérard commence par donner les lois dans le cadre d'un conducteur (loi d'Ohm) puis justifie l'apparition de ce qu'il présente comme un courant dérivé et transitoire par rapport au courant de conduction, qu'il nomme « courant de charge » ou « courant de déplacement » en reprenant l'appellation de Maxwell. Il souligne que ce phénomène a lieu dans le diélectrique du câble (d'importance négligeable dans l'air), et qu'il « cesse lorsque la tension du diélectrique fait équilibre à la différence de potentiel des armatures ». D'autre part, il précise que, dans le diélectrique qui entoure le câble, il existe « un champ électrique dont les lignes de force réunissent les armatures et aboutissent à des quantités d'électricité égales et contraires ». Nous reviendrons plus loin sur le sens dans lequel il emploie le terme de « champ », soulignons simplement ici que Gérard évoque l'existence de charges électriques au niveau des discontinuités de ligne de force, comme le fait Potier à Polytechnique, mais il est beaucoup plus précis sur le rôle du diélectrique environnant.¹⁹

Gérard utilise ces résultats pour établir la loi entre l'intensité et le potentiel. La charge des armatures du diélectrique est $q = \Gamma u$, où Γ est la capacité de l'élément de longueur dx du diélectrique considéré, et u la différence de potentiel (tension). En écrivant un bilan sur ce qu'il désigne comme « la quantité d'électricité », il obtient la relation (à une dimension) $-\frac{di}{dx} = \Gamma \frac{du}{dt}$, traduisant que la quantité d'électricité sortant de l'élément est égale à la quantité entrante augmentée du courant de déplacement dq/dt . En utilisant cette dernière relation et la loi d'Ohm pour un conducteur ($-\frac{du}{dx} = ri$, r étant la résistance par unité de longueur), Gérard établit l'équation de propagation du potentiel, qui est alors une équation de diffusion.

17. Pour la table des matières complète du cours de Gérard voir Grelon 1991, p. 282-5. L'auteur choisit de donner la table des matières de la 3^e édition, datant de 1893, incluant le complément théorique. Une petite erreur place le début de la publication des *Leçons sur l'électricité* en 1891, alors qu'il a lieu une année plus tôt.

18. Gérard 1891, pp. 236-59.

19. Gérard 1891, vol. I, p. 236-7.

Il met en avant l'importance de cette équation dans les travaux de William Thomson sur la télégraphie avec des câbles sous-marins.

Dans un second temps il introduit les phénomènes magnétiques, et donne la « formule d'Ohm complétée » en prenant en compte la force électromotrice due à l'induction dans le milieu : $-\frac{du}{dx} = ri + \Lambda \frac{di}{dt}$. Il justifie cette force électromotrice par « une certaine inertie que le milieu oppose à l'aimantation ». S'il n'établit pas formellement l'équation de propagation complète, Gérard s'attarde sur la forme des relations déjà données, en faisant l'analogie avec la propagation des ondes sonores.²⁰ Il conclut sur ce passage en disant :²¹

Le rapprochement signalé ci-dessus intéresse particulièrement la téléphonie, car il montre que les ondes électriques transmettent la parole suivant des lois identiques à celles qui président à sa propagation dans un milieu pondérable.

Gérard va ensuite comparer les effets d'une induction et d'une capacité au sein d'un circuit, au cours des deux paragraphes suivants. Il y traite du cas particulier de courants alternatifs, avec le comportement d'une capacité dans un circuit soumis à un courant périodique, puis celui d'une induction. Gérard insiste notamment sur l'alternance de charges et de décharges successives. Ces deux passages ont été ajoutés dans la seconde édition. Ils servent à faire le lien avec le paragraphe suivant, dans lequel il aborde le cas des décharges oscillantes. Ce phénomène de décharge oscillante est illustré en établissant l'équation différentielle régissant la charge d'un condensateur pour un circuit comportant résistance, bobine et capacité.²² Gérard établit la valeur de la période des courants de décharge dans un circuit (dans le cas d'un régime pseudo-sinusoïdal), qui vaut $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}$, où R , L et C sont resp. la résistance, l'inductance et la capacité totales du circuit.

Cette étude complète permet à Gérard d'arriver au résultat plus général que la relation $T = 2\pi\sqrt{LC}$ obtenue pour $R = 0$. Elle lui permet également de passer directement à l'étude des ondes dans le milieu ambiant, paragraphe qu'il introduit ainsi :²³

20. On peut rapprocher ce point de la correction que Heaviside apporte aux travaux de Thomson sur les équations de propagation (voir 3.4). Les relations pour les ondes sonores que Gérard évoque sont celles reliant la surpression et la vitesse (linéarisées au premier ordre) : $\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\mathbf{grad}(p)$ et $X_s \frac{\partial p}{\partial t} = \mathit{div}(\mathbf{v})$, où ρ_0 est la masse volumique moyenne du milieu, analogue à l'inductance, et X_s le coefficient de compressibilité isentropique, analogue à la capacité.

21. *Ibid.*, p. 239. Ce passage, ainsi que l'analogie avec les ondes sonores, ne sont pas présents dans la première édition.

22. Un tel circuit, habituel abrégé RLC, donne une équation différentielle sur la charge q du condensateur : $\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = 0$, avec trois solutions possibles selon le signe de la quantité $\frac{CR^2}{4L} - 1$, qui représente le discriminant de l'équation caractéristique.

23. *Ibid.*, p. 250.

La comparaison des oscillations de la décharge électrique avec celles d'un corps élastique vibrant peut être poussée plus loin encore.

Reprenant l'analogie avec les ondes sonores, et l'établissement d'ondes stationnaires, il poursuit :²⁴

Des phénomènes analogues apparaissent dans la propagation des radiations calorifiques et lumineuses formées de vibrations transversales par rapport à la direction des rayons.

Nous laisserons de côté la description faite des expériences de Hertz, description qui se rapproche assez largement de ce qui est donné par exemple dans le cours d'Hospitalier. Nous soulignerons tout de même que, pour la première édition (publiée en 1890), le cours date de 1889 (Gérard y parle du *Traité de Maxwell* paru « il y a seize ans »).²⁵ Les expériences de Hertz sont alors très récentes, et n'ont pas encore connu les différentes répétitions ailleurs en Europe. Sur ce point, Gérard montre toute l'ouverture qu'il souhaite donner à son cours, en abordant un sujet très théorique.

Après la description des expériences de Hertz, Gérard aborde ce qu'il nomme les « Vues actuelles sur la propagation de l'énergie électrique ». Il y rappelle l'analogie rapprochant le courant électrique d'un fluide en mouvement (analogie qu'il évoque dans un autre chapitre, plus tôt dans son cours), et en détaille les limites quant à l'étude de l'énergie électrique. Soulignant que « lorsqu'un courant fluide circule dans un tuyau, aucun effet extérieur ne manifeste sa présence », Gérard illustre en effet l'impossibilité de se contenter de cette vision si l'on considère les effets électro-magnétiques, qui prennent place dans le diélectrique entourant le conducteur. Il donne un résumé précis des idées de Maxwell, démontrées par Hertz :²⁶

Un courant électrique doit être considéré comme le centre d'une perturbation qui intéresse tout ou partie de la masse du conducteur au point de vue de l'effet Joule et qui s'étend de proche en proche dans le milieu ambiant. Cette propagation ayant lieu dans le vide, il en résulte que c'est l'éther qui sert de véhicule aux ondes électriques.

24. *Ibid.*

25. Gérard 1890, p. 221.

26. Gérard 1891, vol. I, p. 237.

Un courant provoque, au moment de sa naissance, une onde électro-magnétique qui se transmet dans l'espace entourant le conducteur avec une vitesse égale à celle de la lumière. Lorsque le courant a atteint son régime permanent, c'est à dire lorsque l'intensité a acquis une valeur constante en tous les points d'une section du conducteur, le milieu ambiant est dans un état de tension qui se manifeste par une tendance à se contracter dans le sens des lignes de force magnétique et à se dilater dans une direction normale à celles-ci.

Ce passage donne une idée suffisamment précise du rôle de l'éther, en particulier la description des contraintes dans le milieu en termes de contraction selon les lignes de force et de dilatation dans le plan normal (voir chap. 2). Il est à noter cependant que Gérard ne définit jamais vraiment l'éther en tant que milieu de propagation, que ce soit pour les ondes lumineuses ou d'autres radiations. La seule mention précédente de l'éther survient dans un paragraphe du début du cours traitant des hypothèses sur la nature de l'électricité, et évoquant les électricités positive et négative, ainsi que l'hypothèse du fluide unique de Franklin (voir plus loin).

Cette absence de détails sur la nature ou le rôle exact de l'éther peut se justifier dans un cours d'électricité. Mais le soin que Gérard met à traiter ces points théoriques aurait pu laisser penser qu'il traiterait un peu plus longuement de l'éther, en particulier du lien entre la propagation des ondes électro-magnétiques « dans le vide » et le fait que l'éther en soit le véhicule. En fait, la raison de cette absence peut être trouvée à la toute fin du chapitre, que Gérard — en tout bon enseignant qu'il est — termine sur une ouverture pleine de promesses :²⁷

Un conducteur doit donc être considéré comme la directrice suivant laquelle s'opère le transfert, de même que la mèche d'une lampe est le centre de la flamme sans constituer le siège de l'effet éclairant. Le siège de la propagation de l'énergie électrique réside dans les tourbillons électro-magnétiques qui encerclent les conducteurs. Quant au mécanisme intime de cette transmission, il est aussi mystérieux que le mécanisme de la gravitation. Avant d'arriver à le définir, les physiciens auront à approfondir les propriétés de l'éther au sein duquel l'action s'accomplit.

Avec cette conclusion, Gérard fait référence à la théorie de Maxwell et ses « tourbillons »,

27. *Ibid.*, p. 259. Gérard renvoie sur ce point à l'ouvrage de Lodge *Modern Views of Electricity* et à l'article d'Alexandre Stoletow, « L'éther et l'électricité » paru dans le journal *La lumière Électrique* en mars 1890 (Stoletow 1890), article que nous détaillerons dans le chapitre 10.

mais il évoque les limites de la théorie qui ne peut pas expliquer le « mécanisme intime » de la transmission.

Cette partie du cours est remarquable de pédagogie et de simplicité. Sur la question des expériences de Hertz et de la théorie de Maxwell, loin d'être évidente, Gérard parvient à dresser un chemin logique en partant des lois de l'électrocinétique (loi d'Ohm, équation de propagation de Thomson). En utilisant les analogies, en particulier la propagation des ondes sonores, il met en évidence les enjeux de la description des ondes électromagnétiques. Concernant les notions particulières à la théorie de Maxwell, le courant de déplacement, et surtout le rôle du milieu diélectrique ambiant, sont largement discutés. Gérard évite de recourir à la notion de polarisation en reprenant le fait expérimental de charge d'un condensateur.

L'autre aspect du cours de Gérard que nous développons ici est l'approche des notions de charge, de polarisation, et de champ. Sur ces différents points, il n'y a pas de changement entre la première et la deuxième édition. Concernant la charge, Gérard se heurte au problème récurrent de la définition d'une charge électrique *dans l'absolu*, sans passer par les effets produits. En conséquence, il n'y a aucune définition concrète de la charge électrique dans son cours. Il commence par décrire les phénomènes d'électrostatique observés, et mentionne « l'électricité » comme « un agent inconnu qui produit ces phénomènes ». ²⁸ Il explique les termes d'électricité « positive » et « négative » en prenant soin de souligner que « ces dénominations n'impliquent pas l'existence de deux espèces distinctes d'électricité, mais qu'elles ne sont que des formes de langage destinées à marquer des états différents d'électrisation ». Il donne aussi l'hypothèse de Franklin sur le fluide unique et ajoute que « d'après des physiciens éminents, Clausius entr'autres (sic), l'électricité ne serait autre que l'éther dans lequel baignent les molécules de tous les corps et qui remplit les espaces interplanétaires ». ²⁹ Ce qui se rapproche le plus d'une définition de la charge électrique est une « loi des actions électriques » : ³⁰

L'ensemble des faits précédents montre que les actions entre les corps électrisés doivent être rangées parmi les forces centrales et que l'on peut définir par *quantité d'électricité*, masse ou charge électrique d'un corps, une quantité proportionnelle à la force qu'il exerce sur les corps électrisés voisins.

On retrouve ici la difficulté de définir la charge électrique et de lui attribuer la primauté. La

28. *Ibid.*, p. 75.

29. *Ibid.*, p. 76. Sur les travaux de Clausius voir Darrigol 2000 (b), p. 213.

30. *Ibid.*, p. 82.

polarisation avait été, pour Maxwell, la façon de contourner cet obstacle. On retrouve cette façon de procéder chez Gérard. La notion de polarisation est abordée dans le paragraphe sur le rôle des diélectriques. Encore une fois, il se sert des analogies pour faire comprendre le concept, en utilisant ici la comparaison avec l'aimantation magnétique. Il avance que la polarisation électrique s'aligne avec les lignes de force, ce qu'il présente comme une hypothèse de Faraday. Dans un condensateur, les charges sont présentes aux extrémités des tubes de force, à la limite avec le milieu conducteur. On retrouve ici l'idée selon laquelle la charge est vue comme une discontinuité de la polarisation (Gérard la présente plutôt comme une charge résiduelle à l'extrémité des tubes de force). Il présente ces charges comme « le déplacement d'électricité » de Maxwell.³¹

Pour définir la charge, Gérard fait donc appel, comme Maxwell, à la notion de polarisation, elle-même définie à partir des lignes de force, qui prennent donc une importance majeure. Dans son cours, Gérard présente d'abord les lignes de force pour le magnétisme — comme les lignes selon lesquelles les corps soumis à la force magnétique s'alignent —, avant de transposer au domaine électrique. Nous montrons que, si le « champ électrique » sert toujours à désigner la région de l'espace dans laquelle se produisent les phénomènes, tous les éléments de la conception actuelle comme champ vectoriel sont présents dans le cours. La première définition que Gérard donne pour le champ électrique est la suivante :³²

Nous entendrons par *champ électrique* un espace dans lequel prennent naissance des forces électriques. L'*intensité* en un point du champ électrique est la résultante des forces qui s'y exercent sur une masse positive prise pour unité. La *direction* de cette résultante s'appelle direction du champ.

En définissant dès le début le concept d'intensité du champ, Gérard évite de faire une distinction entre « champ » électrique et « force » électrique. Tout au long de son cours, il parle ainsi directement d'*intensité du champ*, et de *direction du champ*, pour les cas électrique ou magnétique. Le raccourci est encore plus présent lorsqu'il s'intéresse aux effets électriques créés par une plaque de condensateur et conclut « Mais le champ a aussi pour expression $H = 4\pi K\sigma$, σ étant la densité superficielle ». ³³ Gérard attribue ici au *champ* (et non à l'*intensité du champ* ou à la *force du champ*) une expression mathématique. Cette première mention de « l'expression du champ » comme une expression mathématique peut apparaître

31. *Ibid.*, p. 100. Notons que cette partie sur les diélectriques arrive bien avant le complément théorique sur les expériences de Hertz que nous avons détaillé plus haut.

32. *Ibid.*, p. 83. Les italiques sont de Gérard.

33. *Ibid.*, p. 90.

comme une erreur et être un raccourci trop rapide pour désigne l' *intensité du champ*, mais montre bien la proximité avec une considération mathématique du champ.

Dans la partie sur l'induction électromagnétique, Gérard traite du cas de la « rotation sous l'action des courants induits », et aborde le dispositif de Galileo Ferraris pour la production d'un *champ tournant* à la pulsation a :³⁴

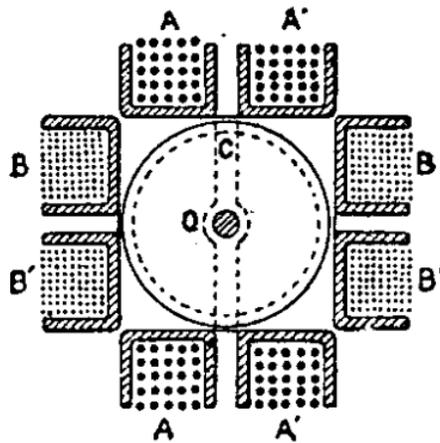


FIGURE 8.2 – Dispositif de Ferraris pour la production d'un champ magnétique tournant. (Tiré de Gérard 1891, vol. I, p. 230). Il constitue la base de ce qu'on appelle aujourd'hui une machine asynchrone : un disque conducteur en rotation autour d'un axe O est entouré de bobinages AA' et BB' créant un champ tournant ; les variations du champ entraînent l'apparition d'une force électromotrice ; des courants induits naissent dans le disque conducteur, constituant alors un moment magnétique qui aura tendance à s'aligner avec le champ. C'est l'impédance du disque qui donne une fréquence de rotation de ce moment différente de celle du champ. Notons que dans les machines modernes le disque est remplacé par une structure type « cage d'écureuil » pour diminuer les pertes par courants de Foucault.

34. *Ibid.*, p. 231. Les notations des résultantes ont été remplacées par B . Un champ tournant est un champ magnétique dont la norme est constante mais dont la direction varie de façon sinusoïdale par rapport au temps. Un premier assemblage de bobines crée un champ à répartition sinusoïdale dans l'espace, avec une dépendance angulaire par rapport à un axe de référence. Un second assemblage, similaire au premier mais décalé spatialement de 90° est parcouru par un courant de même pulsation mais déphasé de $\pi/2$.

Désignons par B l'intensité moyenne du champ créé, à un moment quelconque, dans le disque, par les bobines A A' et dirigé suivant l'axe de celles-ci. B_0 étant l'intensité maximum, on a

$$B = B_0 \sin(at)$$

.

Si l'on suppose que les bobines B B' produisent un champ dont l'intensité maximum est aussi égale à B_0 , mais en retard d'un quart de période, son intensité moyenne dirigée normalement à B est

$$B' = B_0 \sin(at - \pi/2) = -B_0 \cos(at)$$

Les deux champs se composent suivant une résultante ayant à chaque instant pour intensité

$$B'' = \sqrt{B^2 + B'^2} = B_0$$

Dans la description du moteur, les effets magnétiques se produisent dans la même région, quelque soit le système de bobines considéré. Il n'y a donc qu'une seule et même région de l'espace à considérer. Par contre, les intensités dues à chacun des systèmes de bobines vont s'additionner. Pour expliquer l'expression de « composition des champs » qu'utilise Gérard, il est nécessaire de considérer ce qu'il désigne par « champ », non plus selon la définition originale de portion de l'espace, mais bien comme une expression mathématique, avec laquelle on peut réaliser des opérations.

Le caractère vectoriel du champ n'est pas encore prégnant, mais il apparaît à une occasion particulière. En détaillant les travaux de Faraday sur le magnétisme, Gérard montre une figure qui représente l'intensité du champ magnétique, en fonction de la position par rapport à un barreau aimanté, et ajoute la description suivante :³⁵

La [figure précédente] montre les courbes obtenues en portant, sur des normales à l'axe d'un barreau, des longueurs proportionnelles aux composantes du champ suivant ces lignes.

On notera l'utilisation de l'expression de « composantes du champ », qui désigne ici la valeur de l'intensité du champ selon la direction choisie. On retrouve ainsi dans ce cours tous les caractères de l'objet vectoriel qui sont appliqués au terme de « champ » : composantes, expression mathématique, et loi de composition. Bien que Gérard ait défini le champ selon

35. *Ibid.*, p. 44

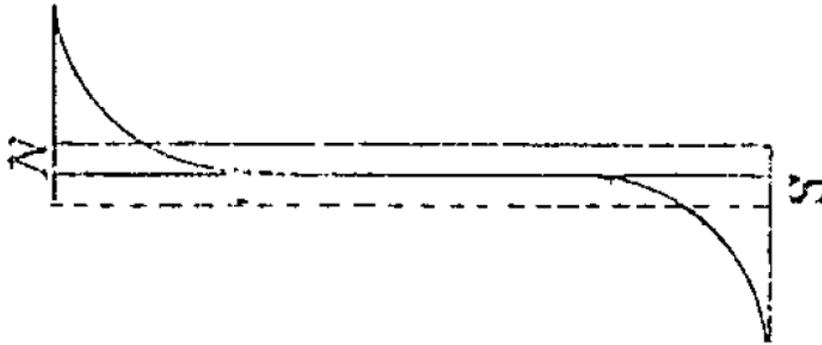


FIGURE 8.3 – Graphique donnant l'intensité du champ magnétique selon la position. (Tiré de Gérard 1891, vol. I, p. 44).

la définition usuelle à l'époque (comme une région de l'espace), il a des difficultés à tenir la distinction entre le champ lui-même et ses caractéristiques.

La description régulière des phénomènes observés en terme de champ ne doit pas être lue au prisme de la théorie de Hertz, qui accorde une place prédominante à cette entité. Gérard a très probablement pris connaissance du mémoire du scientifique allemand où celui-ci expose sa théorie, mémoire traduit et publié en juillet 1890 dans le journal *La Lumière Électrique* (voir note page 224). Il est difficile de dire si le cours publié en 1891, a été intégralement rédigé avant la parution du mémoire de Hertz, où si certains éléments ont été ajoutés après. Mais tous les passages cités plus haut et relatifs au champ sont déjà présents dans l'édition de 1890, et ont donc été rédigés avant le mémoire de Hertz.

Dans un cours qu'il présente comme des *Leçons d'électricité*, Gérard n'hésite pas à passer du côté de la théorie des phénomènes électromagnétiques. Il aborde des points particulièrement précis comme le comportement des diélectriques, le rôle de la polarisation dans l'origine de la charge. il évoque aussi la question de l'éther, bien qu'il écrive que les « mécanismes intimes » de la transmission sont inconnus. Comme nous l'avons signalé plus haut, la présentation des résultats expérimentaux de Hertz est faite d'une manière remarquable de simplicité. Enfin, dans l'ensemble de son cours, une ambiguïté reste sensible quant à l'utilisation du concept de champ, qu'il définit comme une région de l'espace, mais auquel il accorde rapidement des propriétés d'objet mathématique.

8.2 Les grandes écoles civiles

L'École Centrale au premier plan

Depuis sa création en 1829, l'École Centrale des Arts et Manufactures (que l'on désignera plus simplement par « École Centrale » ou « Centrale »), est souvent considérée comme la « Polytechnique civile ». Les deux écoles se rejoignent sur l'objectif commun de formation des ingénieurs. Alors que Polytechnique forme des ingénieurs pour les corps de l'État, l'École Centrale a pour but « former des ingénieurs pour toutes les branches de l'industrie et pour les travaux et services publics ». Pour Paul Melon, qui établit un inventaire des universités et grandes écoles françaises à la fin du XIXe siècle, la différence se ressent principalement dans le caractère appliqué de l'enseignement à Centrale : « Tandis qu'à l'École Polytechnique on fait de la théorie transcendante, ici on fait de la théorie et de l'application ». ³⁶

Cette remarque de Paul Melon selon laquelle Centrale serait plus orientée vers l'application est à nuancer très largement. Si les centraliens sortent de l'école avec un diplôme d'ingénieur des Arts et Manufactures, l'école vise dans la pratique à former des chefs d'entreprise et des cadres. Dans son ouvrage sur le centenaire de l'école, ³⁷ Léon Guillet relate un rapport fait en 1909 à la demande du directeur de l'école : « La question était, en réalité, de savoir si l'enseignement à donner devait toujours être orienté vers la culture générale, ou bien si, au contraire, il devait entrer dans la voie d'une spécialisation plus complète ». ³⁸ Un des passages de ce rapport souligne le rôle de formation généraliste de l'école : ³⁹

Il est incontestable que l'enseignement général donné à l'École Centrale, et malgré une spécialisation partielle, ne forme pas des ingénieurs capables, dès leur sortie, de prendre en main la direction d'un service. C'est là, d'ailleurs, une illusion que personne n'a le droit d'avoir. Tous, les uns et les autres, anciens élèves de l'École Centrale, nous en sommes sortis avec un bagage de connaissances générales, de notions pratiques sur telle ou telle spécialité et une méthode de travail ; mais rien, dans l'enseignement que nous avons reçu, ne peut remplacer la pratique d'un industriel, et tous, en entrant dans la vie, nous devons nous mettre à l'œuvre à nouveau pour acquérir ce complément de l'enseignement que, seule, la réalité des choses peut nous donner.

36. Melon 1891, p. 25.

37. Guillet 1929

38. *Ibid.*, p. 99.

39. *Ibid.*

L'enseignement à Centrale a donc pour but de fournir aux élèves une connaissance générale en sciences, qu'ils devront mettre à profit pour s'adapter ensuite à leur champ de travail. Dans ces conditions, il n'est pas étonnant de constater la diversité des cours donnés au cours des années successives à l'école, avec au moins une vingtaine de matières différentes : des cours classiques de géométrie, de mécanique appliquée ou de chimie, mais également des matières moins ordinaires dans les formations d'ingénieurs parmi lesquelles la botanique, la zoologie, la céramique, la teinture, la verrerie, etc.

Si l'accession se fait aux débuts de l'école par un simple examen, un concours d'admission est institué à partir de 1857.⁴⁰ Sur la période 1870-1900, le nombre annuel de candidats augmente progressivement (de 261 en 1871 à 666 en 1900), mais le nombre d'admis reste stable, à environ 220 élèves, ce qui en fait une promotion comparable à celle de Polytechnique. Par contre la physique y tient une place plus importante dans les épreuves d'admission, puisque les sciences physique représentent environ 30% des sciences à l'écrit et un peu moins à l'oral, alors qu'elle ne compte que pour 20% à l'oral de Polytechnique.⁴¹

La dynamique en faveur de l'électricité, qui se retrouvera dans tous les établissements du supérieur à partir des années 1890, transparaît dès les années 1880. Fidèle à sa réputation d'école tournée vers l'industrie, l'École Centrale est la première grande école à accorder de l'importance à l'électricité, d'un point de vue théorique autant qu'appliqué. Elle possède d'ailleurs un caractère intéressant puisqu'elle propose — au sein de l'école — un cours de physique générale et un cours d'électricité, contrairement au système polytechnicien qui répartissait ces domaines sur Polytechnique et sur l'école d'application. Commençons ici par le cours de physique générale, qui n'est professé qu'en première année. Entre 1882 et 1921, il est donné par Louis Chappuis.⁴² Ancien élève de l'École Normale, où il officie déjà en tant que chef de travaux, Chappuis va modifier le cours de physique dès sa prise de fonction, notamment en accordant une place de plus en plus importante à l'électricité.

Il publie en 1891 des *Leçons de physique générale* en collaboration avec Alphonse Berget, enseignant à la Sorbonne. Ces *Leçons* sont d'ailleurs faites pour s'adresser à la fois aux étudiants de licence ès sciences et aux élèves d'école d'ingénieurs. S'il est difficile de séparer

40. *Ibid.*, vol. I, p. 63-4. À partir de 1857 le concours se fait par sessions hebdomadaires et a pour objectif l'attribution des bourses accordées par l'État, qui commençait à participer à la gestion de l'école. À partir de 1862 le concours prend une forme identique à celle de Polytechnique avec deux sessions annuelles.

41. *Ibid.*, p. 71. Les « sciences physiques » regroupent la physique, la chimie, et l'histoire naturelle. Le reste des « sciences » contient les disciplines mathématiques (dont géométrie analytique, mécanique, épure, arithmétique, algèbre, ...). Guillet donne uniquement le rapport « sciences physiques/sciences », soit pour l'écrit : 33% entre 1867 et 1880, 29% entre 1881 et 1900, et pour l'oral : 25% de 1867 à 1893, 29% de 1894 à 1900. Ajoutons également que les écrits représentent environ 40% du total.

42. Louis Phillibert Claude James Chappuis (École Normale 1874). Référence du cours : Chappuis 1891.

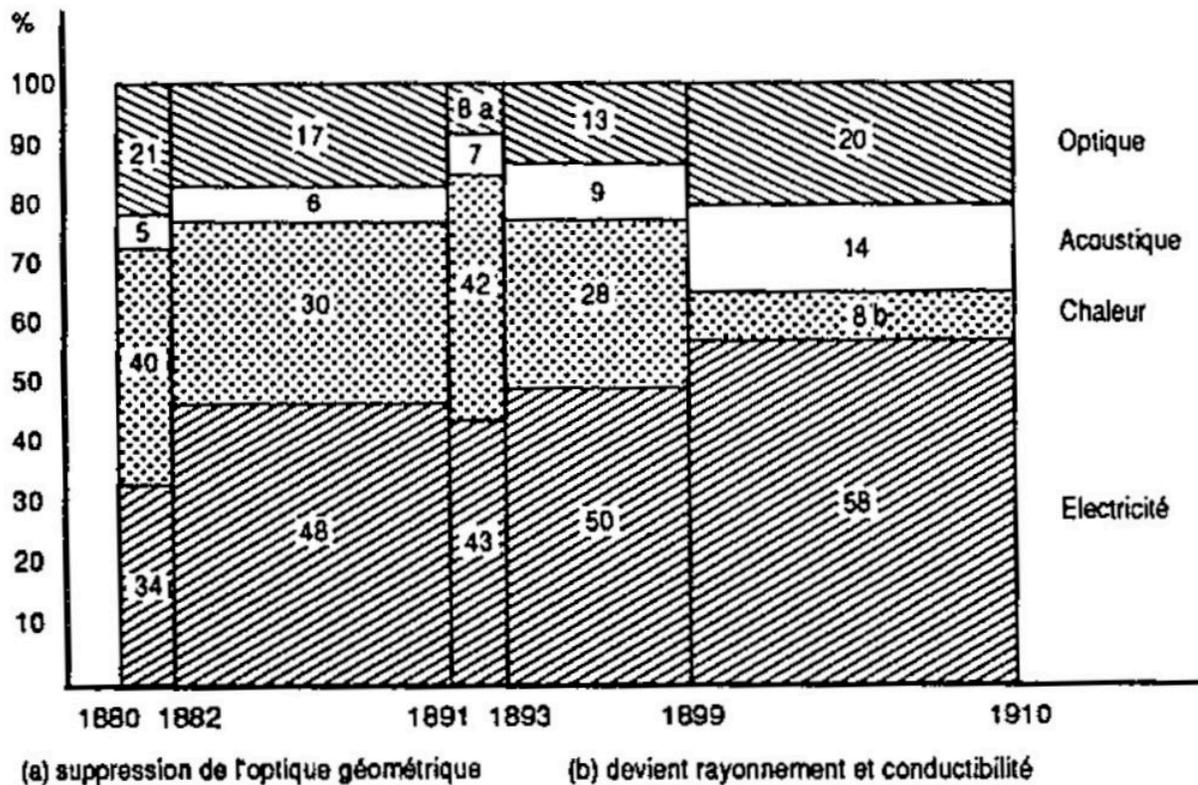


FIGURE 8.4 – Tableau représentant l'évolution du temps consacré aux différentes parties du cours de physique générale selon l'évolution du programme (tiré de Grelon 1991, p. 254-293), les chiffres sont également donnés dans Guillet 1929. Le nombre de leçons est quasiment constant sur toute la période étudiée, soit 60 leçons (59 à partir de 1899). La durée est de 1h30 par leçon. Le nombre de 60 leçons peut paraître important, mais rappelons qu'il n'est enseigné qu'en première année, ce qui fait un total similaire à celui de Polytechnique (2x30 leçons)

ce qui relève concrètement du programme de physique de Centrale et ce qui n'est enseigné qu'à l'université, on peut supposer que Chappuis utilise ces leçons comme support pour son cours à Centrale, et que les élèves ont donc largement accès à cet ouvrage.

Le cours est très complet et regroupe au sein du tome 2 les parties abordant l'électrostatique, l'électricité « dynamique » (électrocinétique), les actions entre courants, l'induction et le magnétisme. Le point que nous allons évoquer est surtout la présence, dans une autre partie, d'un élément qui n'est enseigné nulle part ailleurs. Au sein du tome 3, Chappuis fait un chapitre sur l'électro-optique, et les vérifications expérimentales. Il aborde dans un premier temps l'expérience de Faraday sur la rotation du plan de polarisation (voir chap.

2). Ensuite, dans une partie intitulée « Les théories de Maxwell », Chappuis explique les conceptions de Faraday sur une propagation électrique plutôt qu'une action à distance, et par conséquent opposées à celles de Coulomb. Particularité de ce cours, Chappuis présente surtout l'hypothèse mécanique de Maxwell sur le milieu intermédiaire.

Avant de détailler le contenu de ce passage, il est nécessaire de donner quelques précisions sur les sources utilisées par l'enseignant. La présentation des travaux de Maxwell que livre Chappuis est d'abord très étonnante, si ce n'est erronée. Il avance que :⁴³

Toute l'œuvre de l'illustre physicien anglais est contenue dans les deux volumes de son *Traité d'électricité et de magnétisme* et dans son *Traité élémentaire*. Le *Traité* a été traduit par M. Séligmann-Lui et c'est en partie grâce à ce travail que les doctrines de Maxwell ont pu se répandre en France. C'est d'après le traducteur que nous allons donner cet exposé succinct de la théorie de Maxwell.

Malheureusement pour Chappuis, ce qu'il présente par la suite ne se trouve pas tout à fait dans les références qu'il donne. Précisons tout d'abord que Maxwell publie en 1873 son *Treatise on Electricity and Magnetism* déjà évoqué (voir partie 1), qui sera traduit par Gustave Séligmann-Lui en 1885. Il débute ensuite la rédaction d'un second ouvrage, qu'il souhaite plus accessible. Dans la préface, Maxwell reconnaît la complexité mathématique de son premier *Treatise* et dit : « Dans ce petit ouvrage je me suis efforcé d'exposer, sous la forme la plus compacte possible, les phénomènes qui paraissent jeter le plus de lumière sur la théorie de l'électricité, et de les utiliser, chacun à leur place, de manière à développer, dans l'esprit du lecteur, des idées sur l'électricité ». ⁴⁴

Maxwell meurt en 1879, sans avoir pu terminer la rédaction de cet ouvrage. En 1881, l'éditeur William Garnett publie ces écrits sous le titre *Elementary Treatise on Electricity*, ouvrage constitué en majeure partie de la rédaction de Maxwell, et complété pour les chapitres manquants par des parties issues du « grand » *Treatise*.⁴⁵ C'est cet ouvrage qui sera le premier traduit en français, par l'ingénieur des Mines Gustave Richard en 1884, sous le nom de *Traité élémentaire d'électricité*.⁴⁶ Dans son ouvrage, Richard ajoute une « Notice sur les travaux

43. Chappuis 1891, vol. III, p. 321.

44. Maxwell 1884.

45. Maxwell 1881. Garnett précise dans sa préface que les écrits datent d'environ sept ans avant la publication de l'ouvrage en question, et que sur les treize chapitres qui le constituent : les huit premiers semblaient terminés, les chapitres XI et X manquaient de quelques notes ou tableaux, et les chapitres XI à XIII ont été complétés par des parties du *Treatise*.

46. Maxwell 1884. Richard est sorti en 1871 de l'école des Mines et a travaillé dans plusieurs sociétés industrielles. Source : Bâclé 1912.

en électricité du Professeur Clerk Maxwell », qui est tirée d'une biographie de Maxwell par Garnett.⁴⁷ C'est en partie de cette Notice que Chappuis tire ce qu'il met dans le passage concernant ce qu'il appelle la théorie de Maxwell, et ces idées ne se trouvent ni dans la version anglaise du *Traité élémentaire*, ni dans les versions anglaise et française du *Traité*.

En pensant se référer à l'ouvrage principal, l'enseignant se base en fait sur une Notice ajoutée par le traducteur, reprise d'un ouvrage publié par l'éditeur du *Traité élémentaire*. La connaissance qu'il a des travaux de Maxwell est ainsi à relativiser. Surtout, lorsque Chappuis fait référence au *Traité* de Maxwell et dit que « c'est d'après le traducteur [qu'il va] donner cet exposé succinct de la théorie de Maxwell », il fait un euphémisme. En effet, il livre une copie presque intégrale d'un article que Gustave Séligmann-Lui (le traducteur du grand *Treatise*) publie dans le *Bulletin de la Société Internationale des Électriciens* en 1886 (voir 9.3 p. 283 pour l'article en question).

Pour cette raison, nous ne rentrerons pas dans le détail d'une description du cours de Chappuis, et nous renvoyons le lecteur à l'étude de l'article de Séligmann-Lui dans la partie sur la diffusion dans les journaux (chapitre 9.3). Le plan de cette partie du cours, les titres des sections, les schémas et plusieurs passages étant identiques à ceux de l'article, nous pouvons considérer que c'est une copie presque conforme que Chappuis en donne.

Ces précisions étant apportées, faisons un bilan rapide de cette partie du cours proposé par Chappuis. Il donne les hypothèses du modèle de Maxwell, et les utilise pour justifier les principaux phénomènes électriques (lois des courants, relation courant-force magnétique, loi de Lenz, électrostatique, ...) et électro-optiques (égalité des vitesses de la lumière et du rapport des unités électromagnétique et électrostatique, lien entre la permittivité diélectrique et l'indice de réfraction, opacité des conducteurs, effet Faraday). Ces explications sont avancées de manière intuitive, sans utiliser de démonstration mathématique. À aucun moment cependant Chappuis ne discute la réalité de ce modèle, ni ne met en avant son caractère heuristique, contrairement à l'auteur de l'article qui le précise dans sa conclusion.

Si l'École Centrale est souvent comparée à Polytechnique, la présentation de la théorie de Maxwell faite par Chappuis paraît donc aux antipodes de celle faite par Becquerel à Polytechnique. Chez ce dernier, le cours était vraiment axé sur la démarche calculatoire et l'utilisation des équations, ce qui le rendait peu accessible pour des gens sans une solide formation mathématique. Dans le cours de Chappuis, aucune équation n'apparaît, mais on trouve plusieurs schémas représentant les tourbillons et les sens de rotation. Au sein d'un cours qui s'adresse plutôt à de futurs cadres sans formation poussée en électricité, et à des élèves de

47. Pour le passage en question, Richard donne la référence : Campbell et Garnett 1882, p. 513-559.

licence ès sciences, on trouve un exposé clair et concis des hypothèses heuristiques de Maxwell sur le mécanisme de propagation. Mais on peut rattacher cet état de fait tant à l'objectif de formation de l'école qu'aux connaissances partielles de l'enseignant sur cette théorie. Notons que, dans la partie de son cours dédiée à l'électricité (présente dans le tome 2), Chappuis ne donne pas d'information sur la nature de l'électricité et du courant électrique. Il évoque rapidement l'hypothèse des deux fluides en la présentant comme l'hypothèse historique de Symmer (voir 1.1 et Annexe n°1), sans y faire référence ensuite.⁴⁸

Bien que le cours de physique générale accorde une place de plus en plus importante à l'électricité, un autre élément permet de considérer Centrale comme la première des grandes écoles à adopter l'électricité. Elle est en effet la première école à mettre en place une chaire d'électricité industrielle, au moins à titre officieux. Comme le signale André Grelon :⁴⁹

À partir du milieu des années 1880, les grandes écoles du gouvernement semblent commencer à prendre la mesure des changements. La première à donner le signal du réveil est l'École Centrale.

En 1885, Centrale attribue un poste d'enseignant d'électricité à Démétrius Monnier, ancien élève de l'école. Léon Guillet, dans son livre sur le centenaire de l'école, ne se prive pas d'insister sur le caractère inédit de ce choix :⁵⁰

L'enseignement de l'électricité industrielle a été créé à l'École en 1884, dès que son développement s'est fait un peu sentir, c'est-à-dire au lendemain de l'Exposition spéciale du Palais de l'Industrie (1881). Cette maîtrise de conférences a été la première chaire d'électricité en France et peut-être dans le monde. Elle fut confiée (1885) à Monnier (promotion 1855) qui devint professeur en 1893 et devait conserver la chaire jusqu'en 1914.

Si, dans les faits, c'est bien Centrale qui est la première école à mettre en place une telle chaire, ce n'est pas tout à fait le cas d'un point de vue officiel : Monnier se voit attribuer en 1885 l'enseignement de conférences d'électricité, mais doit attendre 1893 pour qu'une chaire soit créée, et être nommé professeur titulaire. Le programme dédié aux sciences appliquées est déjà bien chargé, avec notamment un cours de Construction des machines (pendant les

48. Chappuis 1891, vol. II, p. 4.

49. Grelon 1991, p. 272.

50. Guillet 1929, vol. I, p. 122.

trois années de scolarité), et un autre de Physique industrielle (en deuxième année), assuré jusqu'en 1888 par Louis Ser (promotion 1853), puis de 1888 à 1920 par Jules Grouvelle (promotion 1861).

Après quelques années, le cours publié par Monnier devient un véritable traité d'électricité. Les premiers chapitres sont dédiés aux théorèmes mathématiques généraux, aux phénomènes magnétiques, puis à l'induction. On trouve dans les chapitres suivants les études des dispositifs électriques : appareils de mesure, machines électro-magnétiques de différents types, transformateurs, électrolyse, transmission de la force, et éclairage électrique. Monnier, qui s'est inspiré de l'ouvrage de Gérard pour rédiger ses conférences, propose ainsi un traité qui se veut exhaustif quant aux applications de l'électricité.

Dans l'étude qu'il fait du cours de Monnier, Grelon considère cet ouvrage comme traitant à la fois les aspects théoriques et pratiques : « Par son ampleur, sa dimension théorique affirmée, l'auteur veut faire œuvre de référence ».⁵¹ Il nous semble nécessaire de préciser que l'aspect théorique abordé par Monnier est uniquement celui de l'électrocinétique, mais non de l'électromagnétisme. À aucun moment l'auteur ne définit la charge électrique. Il en est de même pour la notion de polarisation électrique. Concernant les phénomènes qui régissent le transport de l'énergie électrique, Monnier ne se montre pas plus disert. Le seul endroit où il évoque le rôle des diélectriques dans la propagation apparaît lorsqu'il évoque la mesure de l'isolation des conducteurs. Pour lui, le phénomène de charge d'un diélectrique peut s'expliquer « en supposant que le flux électrique, en se propageant à travers le diélectrique, y détermine une déformation élastique dont l'intensité va en diminuant jusqu'à ce que l'équilibre soit établi ». Malgré cette mention de courants dans le diélectrique, et le caractère élastique de cette déformation, il est difficile de dire si Monnier fait référence à la théorie de Maxwell, qui n'apparaît d'ailleurs à aucun moment dans le cours. Contrairement à la « référence » Éric Gérard, Monnier se refuse à entrer dans le champ des considérations fondamentales.⁵²

Le cours de Vaschy à l'École Supérieure de Télégraphie

Comme nous l'avons déjà vu, l'École Supérieure de Télégraphie (abrév. EST) est créée en 1878 sous l'impulsion d'Adolphe Cochery, qui souhaite s'appuyer sur un corps des télégraphistes. Pour former les ingénieurs qui vont y officier, Cochery met en place une école qui, à l'instar de l'École des Mines ou de celle des Ponts et Chaussées, sera l'établissement

51. Grelon 1991, p. 272.

52. Monnier 1889, p. 101. Dans son commentaire du cours de Monnier, Grelon précise que les premières versions du cours étaient « quelque peu hésitant[es] » (Grelon 1991, p. 273).

de formation attaché au corps émergent. L'ambition est d'ailleurs, à terme, « de positionner l'EST comme école d'application de Polytechnique ». Cet objectif ne sera jamais atteint, et l'école changera d'orientation dix ans après sa création. Mais il est révélateur du souhait éphémère des télégraphistes : une école proposant un enseignement de haut niveau, mêlant la maîtrise mathématique à l'application.⁵³

Le cours de physique est professé dans un premier temps par Jules Raynaud puis, à la mort de ce dernier en 1886, par Aimé Vaschy. Ingénieur des télégraphes, polytechnicien (X 1875), Vaschy publie régulièrement dans le journal des *Annales télégraphiques* ainsi que dans *La Lumière Électrique*.⁵⁴ Le *Traité d'électricité et de magnétisme* qu'il publie en 1890 est la reproduction du cours de Raynaud « à quelques développements près », comme il le dit lui-même.⁵⁵

Dans sa thèse sur l'enseignement des théories électriques en France, Michel Atten met en avant le caractère pionnier de l'École Supérieure de Télégraphie dans l'enseignement de la théorie de Maxwell :⁵⁶

Tranchant avec la plupart des manuels français, le point de vue adopté pour exposer l'électricité théorique (il s'agit d'un cours complémentaire au cours d'électricité) est inspiré directement de Faraday et de Maxwell, à l'exclusion de toute autre tradition théorique. Il est la confirmation de ce que nous avons affirmé par ailleurs : les principaux résultats de Maxwell ont été enseignés, pour la première fois en France, dans une école technique.

Pour affirmer cette primauté, Atten se base sur le cours rédigé par les élèves de Vaschy lors de l'année 1886-87, qui aborde largement la théorie de Maxwell.⁵⁷

Le cours sur lequel nous nous baserons pour la suite de l'étude est le *Traité d'électricité et de magnétisme* que Vaschy publie en 1890. Dès son introduction, il accorde une large place aux idées de Maxwell. Il présente un rapide historique des travaux sur l'électricité et le magnétisme, historique qu'il termine en mentionnant les travaux du Britannique :⁵⁸

53. Grelon 1991, p. 263.

54. Pour les articles dans les *Annales* voir Atten 1992, p. 168. Vaschy est notamment en charge de la « Revue des travaux récents en électricité ». Parmi les articles on trouve par exemple Vaschy 1882, Vaschy 1887 et Vaschy 1888.

55. Vaschy 1890, p. I préface.

56. Atten 1992, p. 169.

57. Le cours de Poincaré à la Sorbonne relatif à ce sujet est professé pendant le second semestre 1887-88, il est donc postérieur au cours de l'EST (voir chap. 11).

58. Vaschy 1890, p. II préface. Les guillemets sont de Vaschy.

Enfin, à défaut d'une loi non encore démontrée expérimentalement, une hypothèse due au génie de Maxwell, et d'après laquelle « la variation du flux d'induction d'un tube de force dans un diélectrique donnerait lieu aux mêmes effets magnétiques qu'un courant » a permis d'achever en quelque sorte l'édifice et d'établir une théorie générale des phénomènes électriques et magnétiques comprenant les faits déjà connus et mettant, en outre, en évidence la vitesse finie de propagation des ondes électromagnétiques. L'importance capitale des conséquences qui en résultent fait vivement désirer une vérification expérimentale de l'hypothèse de Maxwell ; les vérifications tentées jusqu'ici ne paraissent point concluantes.

Insistons sur ce que Vaschy présente comme une « loi non encore démontrée » : l'énoncé qu'il donne de l'hypothèse de Maxwell sonne étrangement proche du prix créé par l'Académie de Berlin en 1879, portant sur les effets dynamiques des courants de déplacement, et auquel Hertz a apporté une réponse expérimentale (voir 4.1). Vaschy détaille largement ces expériences dans la dernière partie de son traité. Dès lors, deux raisons sont envisageables pour expliquer que Vaschy évoque le manque de confirmations expérimentales, et ne considère pas les expériences de Hertz : soit ce cours, publié en 1890, a été fait en partie avant la réalisation des expériences de Hertz (Vaschy l'enseigne à partir de 1886) mais il semble peu probable que l'introduction ait été rédigée avant 1888 et le reste du traité deux années plus tard ; soit Vaschy, comme d'autres physiciens, ne reconnaît pas les expériences de Hertz comme suffisamment convaincantes.⁵⁹ Nous reviendrons sur cette hypothèse plus loin.

Pour appuyer son souhait d'une confirmation expérimentale, Vaschy insiste sur la supériorité de la théorie de Maxwell, notamment par rapport à une théorie basée sur des actions à distance :⁶⁰

Quoi qu'il en soit, l'idée de la transmission des actions de proche en proche, émise depuis longtemps, notamment par Faraday, paraît s'imposer aujourd'hui avec un certain caractère d'évidence. La notion des actions s'exerçant directement à distance entre des masses électriques ou magnétiques lui est équivalente dans l'étude de la plupart des phénomènes *à l'état d'équilibre* ; mais elle lui est absolument inférieure *dans l'étude de l'état variable*.

Tout au long de son traité, Vaschy fait des références régulières aux travaux de Maxwell :

59. Les conséquences des expériences de Hertz ont surtout été acceptées après les répétitions de celles-ci, notamment par Édouard Sarasin et Lucien de la Rive.

60. Vaschy 1890, p. II préface. Les italiques sont de Vaschy.

sur la question des unités (p. 19), des lignes de force en électrostatique (p. 28), sur le rôle des diélectriques (p. 104), et bien sûr dans la partie qu'il dédie aux propriétés du champ électromagnétique. Outre le raisonnement, nous pouvons ajouter parmi les similitudes les notations employées par Vaschy. Ainsi lorsqu'il établit l'équation de propagation des ondes, on retrouve chez lui des notations presque identiques à celles du mémoire de Maxwell.⁶¹ Dans son travail, Atten s'attarde en particulier sur le traitement par Vaschy de l'électrostatique et de l'induction, et nous renvoyons à cet ouvrage pour des arguments plus développés. Nous retiendrons la conclusion d'Atten, selon laquelle la théorie de Maxwell est vraiment enseignée selon les points de vue du scientifique britannique.

Le point que nous allons développer est l'idée que Vaschy donne de l'éther, notamment par rapport aux cours de Polytechnique, cours auxquels il renvoie d'ailleurs au début de son ouvrage.⁶² Il introduit la propagation des ondes électromagnétiques dans l'éther en recourant, comme Maxwell, aux unités :⁶³

Maxwell en a déduit que les ébranlements électriques ou électromagnétiques doivent se propager dans l'éther comme les ébranlements lumineux et avec la même vitesse, établissant ainsi entre les phénomènes optiques et électriques un lien nouveau, qu'il eût été difficile de soupçonner sans le secours des mesures absolues.

Tout au long de son cours, Vaschy conservera l'idée selon laquelle l'éther est le milieu de propagation pour les ondes électromagnétiques. Il n'introduit pas de différence pour désigner le milieu hypothétique de ces dernières et l'éther de la théorie optique. Lorsqu'il discute la nature du milieu en question, il évoque plusieurs hypothèses :⁶⁴

Quelle est la nature du milieu diélectrique que nous avons considéré entre les corps électrisés et qui transmet, en les subissant, les actions électriques ? Sans introduire de nouvelle hypothèse en Physique, on a le choix entre : 1 l'éther seul ; 2 la matière pondérable seule ; 3 un milieu mixte composé de l'éther et de la matière pondérable.

Arguant de la propagation dans le vide (qui exclut la matière seule, l'éther seul étant présent) et le phénomène de biréfringence (qui exclut l'éther seul, puisque la matière a une influence) Vaschy en déduit que la troisième hypothèse est la seule possible.

61. *Ibid.*, p. 394.

62. Vaschy renvoie aux cours de Cornu qu'il a suivi pendant sa scolarité à Polytechnique (1875-1877) et de Potier, qu'il a probablement consulté. Rappelons que la théorie de Maxwell n'était pas encore enseignée à l'X lorsque Vaschy écrit son traité.

63. Vaschy 1890, p. 16.

64. Vaschy 1890, p. 16. Voir Atten 1992, p. 173 pour une discussion sur ce point.

À la fin de son cours, Vaschy fait la comparaison entre la théorie de Maxwell et la théorie des ondulations (soulignons que Vaschy désigne bien par ces termes la théorie optique de Fresnel). Alors que les cours de Polytechnique accordent leur préférence à la théorie des ondulations qui, selon eux, réussit à faire le lien entre optique et électricité (voir page 181), Vaschy donne une large préférence à la théorie de Maxwell.⁶⁵

[II] n'est pas prouvé que ce que, dans la théorie des ondulations, on appelle vitesse d'une molécule soit bien réellement une vitesse et non une autre quantité. Le même doute existe au sujet de la densité δ et de l'élasticité E de l'éther. Du reste, on n'a pas mesuré E et δ séparément, et l'on ne connaît que leur quotient qui est le carré de la vitesse de la lumière. En électromagnétisme, on est plus avancé à cet égard, puisque les coefficients k et k' peuvent se mesurer séparément. En outre, en optique, on ne peut étudier que les vibrations périodiques de l'éther, ce qui est insuffisant pour établir la théorie générale, tandis que l'étude des phénomènes électromagnétiques peut être faite dans l'état permanent et dans un état variable quelconque.

Dans ce passage, Vaschy met en avant certaines difficultés dans la théorie des ondulations, avec la signification attribuée à la vitesse de l'éther, et les valeurs de ses caractéristiques mécaniques (densité et élasticité). C'est donc des points essentiels de la représentation mécanique qu'il juge insatisfaisants dans la théorie des ondulations. Il soulève également la question du type de signal étudié. Sur ce point cependant, il n'est pas évident de comprendre à quel phénomène Vaschy fait référence lorsqu'il parle de « phénomènes électromagnétiques dans l'état permanent ». Il s'agit probablement des phénomènes d'électrostatique, auxquels Maxwell a appliqué sa théorie en retrouvant la loi de Coulomb, et de magnétostatique. Dans ce cas il serait difficile d'y voir un équivalent « statique » à la lumière. Vaschy peut aussi évoquer les ondes électromagnétiques stationnaires réalisées par Hertz, dont l'équivalent lumineux est effectivement inaccessible, la longueur d'onde étant trop petite.⁶⁶

Même s'il donne un net avantage à la théorie électromagnétique, Vaschy ne reconnaît pas de preuve expérimentale à la théorie électromagnétique de la lumière. Il commence par nuancer ses propos dans le paragraphe suivant, en rappelant que les expériences réalisées sur

65. Vaschy 1890, p. 402. Les coefficients k et k' auxquels Vaschy fait référence sont les constantes présentes dans les lois de Coulomb de l'électrostatique et du magnétisme, et correspondent resp. à la permittivité diélectrique (au facteur numérique 4π près) et la perméabilité magnétique du milieu.

66. On peut rappeler ici que le problème de la réalisation d'ondes lumineuses stationnaires intervient dans la réalisation du laser, qui n'est mise en place qu'à partir des années 1960.

les ondes électromagnétiques ont été faites avec des ondes de période largement supérieures à celle de la lumière. Directement après, il aborde le paragraphe portant sur les expériences de Hertz, qu'il décrit comme « les expériences les plus précises que l'on ait faites pour mettre en évidence l'analogie de caractère des ondes lumineuses et des ondes électromagnétiques ». ⁶⁷ Bien qu'il traite largement de ces expériences, il ne parle à aucun moment de la confirmation de l'hypothèse de Maxwell qu'il mentionnait dans son introduction sur les effets des courants de déplacement. Pour reprendre l'hypothèse que nous avons formulée plus haut, il est donc fort possible que Vaschy n'ait pas reconnu dans ces expériences de Hertz une confirmation de ces effets, probablement car les domaines de longueur d'onde sont trop différents.

Discutons un dernier point sur le rôle de l'éther pour Vaschy. Lorsqu'il évoque la théorie électromagnétique de Maxwell et « l'identité des ondes lumineuses et électromagnétiques », Vaschy conclut que « la comparaison en question ne pourra en toute rigueur confirmer ou infirmer l'idée émise par Maxwell en 1865 ». ⁶⁸ Cette référence à un travail de Maxwell de 1865 — probablement le mémoire *Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* — est surprenante : si dans ce dernier mémoire Maxwell développe effectivement une partie sur la théorie électromagnétique de la lumière, l'hypothèse a été émise dès 1861-62 dans le mémoire *On Physical Lines of Force*.

Erreur due à une méconnaissance du mémoire en question, qui n'est que très peu diffusé en France ? Ou référence volontaire à une démonstration dynamique, quitte à omettre la première formulation de l'hypothèse par Maxwell ? Étant donné le soin apporté par Vaschy à démontrer la supériorité de la théorie de Maxwell, et ce en utilisant les méthodes du Britannique, la seconde hypothèse nous paraît peu probable. À plusieurs reprises dans son cours, Vaschy fait référence aux travaux d'Émile Verdet. ⁶⁹ Or, comme nous l'avons vu, dans un des articles publiés Verdet cite explicitement le mémoire de Maxwell *On Physical Lines of Force*, en précisant la référence et les dates de publication (voir 9 p. 158). Il y résume également en quelques lignes le modèle mécanique de Maxwell, même s'il ne fait pas le lien avec une théorie électromagnétique de la lumière. À l'inverse, Verdet ne cite à aucun moment le mémoire de 1865.

On peut donc s'attendre à ce que Vaschy connaisse plutôt le mémoire de 1861. Dans tout son cours, le seul travail de Maxwell auquel il fait explicitement référence est le *Traité d'électricité et de magnétisme*, uniquement la traduction française de 1885 (avec les notes

67. Vaschy 1890, p. 403.

68. Vaschy 1890, p. 403.

69. La compilation de travaux : Verdet, *Notes et Mémoires* (Verdet 1872) apparaît notamment en note p. 414 et 418.

d'Alfred Potier). Si les démonstrations de la théorie électromagnétique y sont présentes, notamment l'importance des unités, le modèle initial est absent. Il n'y a donc aucune certitude que Vaschy ait pris connaissance du mémoire de 1861, et de la présence de l'hypothèse sur la théorie électromagnétique de la lumière.

L'électricité arrive officiellement au Conservatoire des Arts et Métiers

À la fin du XIXe siècle, le Conservatoire des Arts et Métiers est une institution respectée dans le paysage de l'enseignement français. Des professeurs reconnus, comme Edmond Becquerel pour la physique, y dispensent des leçons bi-hebdomadaires. Les cours sont suivis par des auditeurs souvent nombreux, avec par exemple une moyenne de près de 362 élèves assistants aux cours de physique appliquée.⁷⁰

En 1890, une chaire d'électricité est créée au sein de l'établissement. Le jury est composé d'Edmond Becquerel, qui occupe alors la chaire de physique générale au sein de l'institution, Joseph Hirsch, professeur de machines à vapeur aux Ponts et Chaussées, et Éleuthère Mascart, qui occupe, comme nous l'avons vu, une place importante dans le paysage des électriciens français depuis l'Exposition de 1881 (voir 5.2 p. 145). Lors du Congrès des électriciens cette année-là, les talents de médiateur de ce dernier avaient d'ailleurs été unanimement loués dans l'établissement du débat sur les unités. Pour cette nomination de professeur en chaire d'électricité, il aura également fort à faire.

Il faut dire que les candidats au poste jouissent d'états de service de grande qualité. Marcel Deprez reste un ingénieur reconnu, bien que mis à mal par les controverses avec Lucien Gaulard sur l'utilisation du courant continu ou alternatif, et surtout celles sur ses propres expériences. Ernest Mercadier, répétiteur à Polytechnique entre 1875 et 1882, n'est pas en reste, puisqu'il est « l'un des premiers à porter le nom officiel d'électricien en France », l'un des deux ingénieurs-éлектриens de l'administration des postes et télégraphes à partir des années 1860 (le second étant Théodore du Moncel).⁷¹ Démétrius Monnier, qui occupe un poste de maître de conférences à l'École Centrale, et Édouard Hospitalier, professeur à l'EMPCI, sont déjà bien installés. Félix Lucas, ingénieur des Ponts et Chaussées, Georges Dumont et Maurice Thiercelin, tous deux centraliens, et Antoine Reignier, qui se présente comme ingénieur électricien, complètent le tableau. Si la chaire est finalement attribuée à Marcel Deprez le choix ne fut pas évident et, d'après le rapport de nomination, les débats

70. Voir : Fontanon et Grelon 1994, p. 45. Le cours de physique appliquée est d'ailleurs le cours le plus suivi. À titre de comparaison, le cours de géométrie descriptive est suivi par en moyenne 48 élèves.

71. Grelon 1991, p. 256.

furent animés.⁷²

Dans ce rapport de nomination, la création de la chaire est justifiée — une fois encore — par la place promise à l'électricité dans l'industrie. En outre, les rédacteurs du rapport mettent en avant la vision qu'ils ont de l'électricité comme une science sortie « des laboratoires de physique » :⁷³

L'électricité industrielle, qui prend [de nos jours] des développements plus considérables, et qui promet d'occuper dans un avenir peu éloigné, une des premières places dans nos industries, a affecté, dès ses débuts, une allure particulière : elle est sortie, pour ainsi dire, de toute pièce, des laboratoires de physique et des calculs des analystes. Cette allure, elle l'a conservée dans toutes ses applications ; ce n'est qu'à l'aide d'instruments de mesure délicats, et de calculs mettant en œuvre toutes les ressources de l'analyse, que l'on peut installer, contrôler, entretenir et faire fonctionner les canalisations d'électricité, les distributions et les appareils générateurs, récepteurs [d'électricité].

D'après les rapporteurs, l'électricité — même appliquée à l'industrie — serait issue des « laboratoires de physique » et des « calculs des analystes ». Dans le sommaire du cours que Deprez donne au Conservatoire, cette tonalité d'une électricité issue de la théorie résonne dans les titres donnés aux leçons (voir figure 8.5).⁷⁴

L'arrivée de Deprez et la création d'une chaire d'électricité industrielle masque en partie l'importance qui était déjà attribuée à l'électricité au CNAM, à travers le cours de Physique. Depuis 1853, c'est Edmond Becquerel qui est en charge de ce cours. Dès sa première année, il intitule son cours « Physique appliquée aux arts ».⁷⁵ Ce cours s'étale sur deux années, et le programme des leçons alterne d'une année sur l'autre. L'un des deux programmes traite des lois générales de la physique, des phénomènes optiques et acoustiques, ainsi que des « applications diverses de la chaleur ».⁷⁶ L'autre programme est presque exclusivement dédié à l'électricité. Ainsi, sur les 39 leçons qui constituent le cours pour l'année 1869-1870, on trouve : 2 leçons sur les lois générales de l'électricité, 5 leçons sur les machines de production

72. CNAM 1890.

73. *Ibid.*

74. La mise en place de ce cours sera profitable à beaucoup, puisque la moyenne d'auditeurs pour la première année est de 324, ce qui en fait le deuxième cours le plus suivi. Source : *Ibid.*

75. Son prédécesseur était Claude Pouillet, connu pour avoir énoncé en électrocinétique la loi de Pouillet, établissant l'intensité dans un circuit possédant plusieurs résistances. Il donne jusqu'en 1852 un cours de « Physique appliquée aux arts et démonstration de machines ». Fontanon et Grelon 1994, p. 171.

76. CNAM 1882, année 1881-1882.

Programme du cours	
1	Révision rapide des lois de l'induction
2	Révision des lois de l'induction (fin)
3	Théorie de l'anneau Pacinotti
4	Théorie de l'anneau Pacinotti
5	Problèmes de l'induit d'une dynamo
6	Calcul des dimensions d'un anneau de dynamo
7	Calcul des dimensions d'un anneau de dynamo devant satisfaire à des conditions données
8	Calcul des dimensions d'un anneau de dynamo devant satisfaire à des conditions données (fin)
9	Calcul des inducteurs d'une dynamo
10	Calcul des inducteurs d'une dynamo
11	Calcul des enroulements des inducteurs d'une dynamo
12	De la caractéristique d'une dynamo, excitation et série.
13	Réaction de l'induit — Théorie de la caractéristique d'une dynamo excitée en série
14	Caractéristique d'une machine excitée en dérivation — Double enroulement
15	Du double enroulement et de la régulation des machines dynamo-électriques
16	De la régulation des machines dynamo-électriques — Double enroulement etc. . .
17	Des moteurs électriques — Équation fondamentale
18	Propriété des moteurs électriques à champ constant et à potentiel constant
19	Moyens employés pour rendre invariable la vitesse d'un moteur électrique. Régulation automatique des moteurs électriques
20	Calcul des dimensions d'un moteur électrique
21	Calcul des dimensions d'un moteur électrique
22	Description de divers types de dynamos
23	Description et étude de divers types de dynamos
24	Étude de divers types de dynamos (fin) — Transmission de la force
25	Transmission de la force — Principe fondamental
26	Transmission de la force
27	Calcul d'un projet de transmission de force
28	Calcul d'une transmission de force à distance
29	Équations générales des courants sinusoïdaux
30	Théorie des alternateurs
31	Mesure des divers éléments d'un courant alternatif
32	Mesure des divers éléments d'un courant alternatif

33	Description et données relatives à quelques alternateurs
34	Description de plusieurs alternateurs
35	Description et théorie de quelques alternateurs
36	Théorie des moteurs synchrones — Des champs magnétiques tournants
37	Champs magnétiques tournants — Courants polyphasés
38	Génératrice à champ tourné — Exemples pratiques des transformateurs
39	Des transformateurs

FIGURE 8.5 – Sommaire du cours d'Électricité industrielle donné par Marcel Deprez au CNAM entre novembre 1899 et avril 1900.

d'électricité statique et les dispositifs électriques de mesure (électroscopes, galvanomètre), 13 leçons sur les actions chimiques, mécaniques et lumineuses de l'électricité (piles, électrochimie, arc électriques...), 6 leçons sur le magnétisme, l'induction et l'électrodynamique des courants, et 8 leçons sur les applications diverses de l'électricité (télégraphie, horlogerie, éclairage). Les 5 dernières leçons sont dédiées aux actions chimiques de la lumière, essentiellement la photographie.⁷⁷

En 1870, l'électricité n'a pas encore fait son entrée dans le monde de l'industrie de forte puissance. Les applications déjà utilisées sont celles nécessitant des générateurs de puissance modérée, comme la télégraphie ou l'horlogerie. On retrouve ces applications dans les cours de l'institution technique qu'est le Conservatoire. Il faut dire que le professeur Edmond Becquerel n'est pas un inconnu. Fils d'Antoine-César Becquerel, professeur de physique au Muséum d'histoire naturelle, Edmond officiait déjà auprès de lui avant d'être nommé au Conservatoire, ainsi qu'à l'École Centrale, en tant que répétiteur, à partir de 1840. Ils rédigent ensemble en 1856 un *Traité d'électricité et de magnétisme, leurs applications aux sciences physique, aux arts et à l'industrie*, regroupant les cours qu'ils donnent dans leur institution respectives. Edmond Becquerel est le père d'Henri Becquerel, qui sera professeur à Polytechnique à partir de 1894 (voir 6.1 p. 159).

Ce milieu familial a probablement influé sur la volonté d'Edmond de tourner son enseignement vers les applications, avant même sa nomination au Conservatoire. Mais l'enseignement dont il est chargé va également agir sur lui, ainsi que sur ses recherches :⁷⁸

77. CNAM 1882, année 1869-1870.

78. Fontanon et Grelon 1994, p. 174.

Le caractère appliqué des deux enseignements de Becquerel et le profil de ses auditeurs, sans formation mathématique poussée, a certainement orienté la nature de ses recherches et, en tout cas, une partie notable de ses activités.

Parmi les « activités » d'Edmond, on trouve au premier rang l'étude du phénomène de phosphorescence, étude dont il est considéré comme le précurseur : ⁷⁹

Depuis son premier travail avec son père et [Jean-Baptiste] Biot en 1859, jusqu'à ses derniers mémoires de 1887-88, la phosphorescence constitue le domaine privilégié d'Edmond Becquerel. S'il n'a présenté aucune théorie, restant même en deçà de l'hypothèse formulée par son père sur la nature électrique de la phosphorescence, il balaye tous les aspects du phénomène : étude de la composition du rayonnement actif, durée de la phosphorescence suivant les corps, intensité du rayonnement émis et loi de sa décroissance, analyse spectrale de ce rayonnement, influence de la température, synthèse de séries de nouvelles substances phosphorescentes. Ses outils sont d'abord le spectroscope destiné à l'analyse de la lumière, reçue ou émise, et le photomètre pour mesurer l'intensité de la lumière. Il y ajoute en 1858 un instrument de son invention pour étudier les phosphorescences de courte durée, le phosphoroscope.

Le successeur de Becquerel au cours de physique du Conservatoire est un normalien, Jules Violle. Passé par les universités de Lyon et Grenoble, Violle a travaillé sur les mesures de rayonnement et l'étude des hautes températures de certains métaux. Il publie à partir de 1883 un cours de physique, qu'il souhaite éditer en quatre volumes : le premier porte sur les « propriétés générales des corps » (principalement mécanique et propriété des solides), le deuxième sur l'acoustique et l'optique, le troisième sur la chaleur, et le dernier sur l'électricité et le magnétisme. Malheureusement seuls les deux premiers volumes seront publiés. ⁸⁰ Nommé professeur au Conservatoire en 1890, l'année où Marcel Deprez obtient la chaire d'électricité, Violle modifie assez largement le programme de physique.

Pour la première année de cours, l'étude des lois de la pesanteur (notamment pour le pendule simple) et la mécanique des fluides (hydrostatique et poussée d'Archimède) sont abordées. Les leçons prennent des titres plus simples, mentionnant « diffusion », « chaleur »,

79. *Ibid.*, p. 179.

80. Violle 1883. Voir l'avertissement de l'éditeur. Ces cours bénéficient d'une large diffusion, puisqu'ils seront notamment traduits en allemand (Violle 1892 (b)). Albert Einstein les aura dans la bibliothèque familiale (Bracco 2017, p. 56.).

ou « capillarité ». ⁸¹ Ce programme alterne avec celui qui aborde les thèmes de l'électricité et du magnétisme, les titres des leçons restant également assez généraux : sur 39 leçons, 3 portent sur le magnétisme ; 9 sur l'électricité statique et les diélectriques ; 11 sur l'électrocinétique, l'électrolyse et la galvanoplastie ; 10 sur l'électro-magnétisme et l'induction ; 6 sur les courants alternatifs, les ondes hertziennes et l'éclairage électrique. ⁸²

Le cours de Becquerel était largement orienté en faveur des applications techniques de différents phénomènes physiques (électricité, chaleur, ...). À l'inverse, le cours de Violle semble se limiter à une étude plus théorique (le titre très général des leçons ne permet pas de déduire le contenu de façon aussi détaillé que pour le cours de Becquerel). Ce changement d'orientation peut d'une part être attribué au changement de professeur. Mais, bien qu'aucune motivation n'ait été trouvée dans les comptes rendus de conseil, il est difficile de ne pas voir de lien avec l'arrivée cette même année de l'enseignement d'électricité industrielle. Le cas échéant, la création d'un tel enseignement a entraîné une véritable réorientation des programmes, en laissant au cours de physique — toujours officiellement intitulé « physique appliquée aux arts » — une étude des lois fondamentales plutôt que des applications.

8.3 Dans les pas de Paul Janet : de la faculté de Grenoble aux instituts électrotechniques et à l'ESE

De par sa carrière, Paul Janet traverse les 15 dernières années du XIXe siècle en croisant la route des différentes voies de formation en électricité. De l'École Normale à l'École Supérieure d'Électricité, en passant par les premiers cours d'électrotechnique à l'université de Grenoble, Janet devient une figure incontournable de l'électricité. Alors que tous les grands noms de l'enseignement ont participé à l'Exposition de 1881, Janet incarne aussi une nouvelle génération d'enseignants, qui ont grandi avec l'électricité.

Les premiers cours

Lorsque Paul Janet met en place un cours du soir dédié à l'électricité à l'université de Grenoble en 1892, il n'est plus un inconnu. Issu de l'École Normale Supérieure, il est arrivé à Grenoble en 1886, pour y enseigner la physique, sur les conseils de son maître Jules Violle. Janet consacre d'ailleurs la première séance de son cours de physique de 1886, séance en forme

81. CNAM 1910, année 1899-1900.

82. *Ibid.*, année 1907-1908.

d'introduction, à exposer les liens et différences entre physique mathématique et physique expérimentale. Pendant cette séance, Janet fait surtout valoir son attachement à une physique qui serait un développement mathématique issu de certitudes expérimentales, sans vouloir opposer les deux visions. Considérant Newton comme le pionnier de cette tradition, Janet insiste sur le caractère « incertain » d'un développement mathématique sans connaissances tirées de l'expérience, et celui « impuissant » d'une physique purement expérimentale qui n'utiliserait pas les outils mathématiques.⁸³

Pour illustrer son propos, Janet se base notamment sur deux domaines : la théorie de la chaleur (adaptée aux échanges thermiques), avec pour grande figure Sadi-Carnot, et la théorie de l'électromagnétisme, menée par Ampère. Nous développerons ici le second exemple. Janet utilise ce cas pour montrer l'influence parfois néfaste de ce qu'il désigne comme des « hypothèses » sur l'édification d'une science. Il aborde en premier lieu le cas de l'électro-dynamique, science dont il attribue la création à Ampère, et des hypothèses successives relatives :⁸⁴

Au créateur de cette science, qui avait voulu à dessein lui laisser un caractère exclusivement expérimental, ont succédé les chercheurs d'hypothèses ; on a voulu essayer de rattacher ces phénomènes aux principes généraux de la mécanique ; les courants électriques étant considérés hypothétiquement comme de véritables courants de fluides électriques hypothétiques eux-mêmes, on a cherché les forces que devraient exercer les unes sur les autres les molécules de ces fluides en mouvement pour expliquer les phénomènes dont il s'agit ;

Dans la suite du paragraphe, Janet évoque en particulier la contribution du physicien allemand Wilhem Weber à l'électro-dynamique, et fait référence à la loi éponyme donnant la force s'exerçant entre différents éléments de courants, qui dépend de la position relative mais également des dérivées temporelles de celle-ci :⁸⁵

83. Janet 1887, p. 34.

84. *Ibid.*, p 36.

85. *Ibid.* Les italiques sont nôtres.

On a trouvé que des forces centrales ordinaires, fonctions seulement de la distance, ne suffisaient pas pour expliquer les phénomènes en question, qu'il fallait les faire dépendre, en outre, de la vitesse et même de l'accélération des points entre lesquels on la suppose agir ; et sous le nom de loi de Weber, cette loi a régné sans contestation en Allemagne pendant de longues années. Puis il a fallu l'expliquer elle-même, et on a voulu, à l'aide d'hypothèses nouvelles, la rattacher à la loi générale de la gravitation universelle. *Toutes ces spéculations, quelque intéressantes qu'elles fussent, ont laissé intacte et entière la théorie d'Ampère.*

Ainsi, si Janet reconnaît la qualité des différentes « spéculations » faites sur les phénomènes concernés, il préfère retenir que l'approche expérimentale d'Ampère demeure toujours aussi importante. Dans le cas de l'électrostatique, le jugement est plus sévère, et Janet remet en cause ce qu'il nomme des « abstractions de langage » :⁸⁶

On parle de fluides électriques, d'éther lumineux ; on attribue à ces fluides des propriétés spéciales : actions à distance pour les fluides électriques ; élasticité, incompressibilité pour l'éther lumineux : ce sont bien là de ces hypothèses physiques et mécaniques que Newton exclut du domaine de la science expérimentale.

Janet précise ensuite sa pensée en s'attachant notamment à la vision de l'électricité. Il oppose les « hypothèses » faites sur la nature de l'électricité, et qui sont selon lui trompeuses car non vérifiables, à la « loi » de la gravitation :⁸⁷

L'important développement qu'a pris l'hypothèse des fluides électriques tient en grande partie à la facilité qui en résulte pour le calcul, et surtout pour la manière de présenter ce calcul ; l'électricité n'a alors plus rien de mystérieux ; c'est une substance matérielle, quoique impondérable, dont les parties s'attirent ou se repoussent suivant la loi newtonienne, c'est-à-dire en raison directe des masses et en raison inverse du carré des distances. [...] Mais qui ne voit la différence entre cette hypothèse et cette loi [de la gravitation] ? L'une s'applique à des masses matérielles, tombant sous les sens directement, tandis que l'autre s'applique à un fluide dont rien ne démontre l'existence et qui risque fort de n'être qu'une création de notre imagination.

Plus que l'hypothèse en elle-même, Janet remet surtout en cause la trop grande facilité

86. *Ibid.*

87. *Ibid.*

avec laquelle elle peut être acceptée et utilisée par la suite dans la construction scientifique. Prenant l'exemple des travaux de Poisson et de Green, il considère que l'hypothèse des fluides électriques est fructueuse mais que les formules auxquelles elle aboutit doivent, si elles sont vraies, pouvoir être retrouvées indépendamment « du moyen particulier que nous avons employé pour y parvenir ». Pour lui, même les termes relatifs aux hypothèses initiales doivent être abandonnés :⁸⁸

C'est ce que l'on tente de plus en plus de faire dans l'enseignement actuel de l'électricité ; toutes les grandeurs que l'on a à considérer dans cette science comme masse électrique, densité électrique, etc., dont les noms sont encore empruntés à la théorie des fluides, peuvent aisément recevoir une définition expérimentale et indépendante de toute hypothèse ; un effort un peu plus grand de l'esprit arriverait certainement à dépouiller complètement l'idée d'électricité de celle de fluide électrique.

L'étude de ce cours nous renseigne à plus d'un titre sur la vision qu'à Janet de la théorie électromagnétique, tant au point de vue de ses connaissances que de l'enseignement qu'il veut en faire. Le dernier passage sur la présence récurrente des notions de « masses » électriques ou magnétiques dans l'enseignement français peut nous faire penser au cours de physique donné la même année à Polytechnique par Potier, au sein duquel on trouve ces termes employés très largement. Critiquant ceux qu'ils désignent comme des « chercheurs d'hypothèses », Janet souhaite mettre en avant sa vision de la science : une construction bâtie sur un socle de connaissances expérimentales, et s'élevant par des travaux mathématiques, mais indépendant des hypothèses sur certains concepts non sensibles, comme l'électricité.

En 1890, Janet soutient sa thèse à la Faculté des Sciences de Paris. Dans son travail portant « Sur l'aimantation transversale des conducteurs magnétiques », publié entre autres dans le *Journal de Physique* et dans les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*,⁸⁹ il s'intéresse au calcul de l'aimantation des corps magnétiques soumis à un champ magnétique (créé par un courant électrique). Ces travaux montrent en particulier une maîtrise de la théorie de Maxwell. C'est donc nanti de solides connaissances en électromagnétisme, et d'une ouverture manifeste par rapport aux différentes théories, que Janet va changer de voie et se lancer dans l'électricité un soir de février 1892.

Les cours qu'il donne lors de cette première année, en février et mars 1892, sont retranscrits dans son livre *Premiers principes d'électricité industrielle*. La table des matières,

88. *Ibid.*, p. 37.

89. Pour la thèse de Janet voir : Janet 1890.

forcément succincte étant donné le peu de temps accordé à ces cours, mentionne surtout des introductions à différentes notions, notamment la conservation de l'énergie, les différents générateurs (pile, dynamo, générateurs industriels, ...) et récepteurs (chimiques, thermiques, ohmiques). Viennent ensuite des rappels de « mécanique appliquée » (puissance, travail, unités, rendement), des généralités sur les courants, puis les chapitres sur les courants (courant continu puis alternatifs) et les transformateurs.⁹⁰

À aucun moment Janet ne donne d'hypothèse « matérielle » sur la nature de l'électricité, restant dans sa conviction initiale. Le cours dont nous avons détaillé l'introduction était un cours de physique, dans lequel on aurait pu s'attendre à certaines hypothèses en ce sens. Celui donné en 1892 est purement un cours d'électricité, dont il exclut toute considération théorique, et Janet s'adapte à son public d'industriels. Dans la partie sur la nature de l'électricité, les analogies mécaniques qu'il donne visent plutôt à illustrer le transport de l'énergie. Il compare d'abord le rôle d'une courroie (cas mécanique) ou de l'eau (cas hydraulique) en tant qu'intermédiaires à celui de l'électricité : « L'électricité va jouer ce rôle tout à fait analogue à celui de ces intermédiaires (eau, courroie). Mais, tandis que ceux-ci ne sont capables de transporter qu'une seule espèce d'énergie (l'énergie mécanique), l'électricité peut transporter une forme quelconque de l'Énergie ». L'autre analogie porte sur le rôle de la tension délivrée par le générateur, qui « élève » l'énergie, à l'inverse d'une chute d'eau qui possède une énergie potentielle plus élevée au sommet, avant de diminuer. Il donne également une explication claire du concept de lignes de force, mais ne mentionne à aucun moment Faraday.⁹¹

Janet professe ce cours d'électricité industrielle pendant les deux années suivantes, avec un format plus académique de cours en journée. Au début du cours de deuxième année, il constate d'ailleurs :⁹²

Lorsqu'il y a un an, j'entreprenais d'exposer en quelques leçons les premiers principes de l'électricité industrielle, j'exprimais le regret que si peu de temps put être consacré à cette étude, et qu'un sujet prêtant à de si amples développements dut être renfermé dans l'espace de deux mois. Ce regret a été entendu ; au lieu de quelques rapides conférences, nous inaugurons cette année un véritable cours dans lequel nous pourrons sans être pressé par le temps, donner à chaque question l'importance qu'elle comporte.

90. Janet 1893 (a). Dans la préface, Janet souligne que « Cet ouvrage est la reproduction presque textuelle des leçons qui ont été professées à la Faculté des Sciences de Grenoble pendant les mois de février et de mars 1892, sous les auspices de la Municipalité de cette ville ».

91. *Ibid.*

92. Janet 1893 (b), p. 1.

Dans ces cours, et bien qu'ils soient plus développés que ceux de la première année, Janet ne traite à aucun moment davantage de la nature de l'électricité. En particulier, la notion d'éther ou de théorie électromagnétique de la lumière en est complètement absente. Nous retrouvons ici une situation assez similaire à celle d'Alfred Potier enseignant à l'École des Mines : un enseignant très au courant de la théorie de Maxwell et de ses enjeux (Potier publie des articles comme nous le verrons dans le chapitre suivant, Janet fait sa thèse sur un sujet proche), mais un détachement presque complet lorsqu'il s'agit d'enseigner de l'électricité, domaine dans lequel les conceptions théoriques n'ont pas leur place.

Sur cette comparaison entre Potier et Janet, d'autres facteurs diffèrent cependant : Potier enseigne dans le cadre d'écoles qui garde certaines lignes directrices de la physique française (comme nous l'avons vu pour Polytechnique, voir chap. 6) ; Janet semble justifier ce détachement par des conceptions plus personnelles sur les liens entre théorie et application. Ce trait se retrouve dans ses écrits en tant que directeur de l'École Supérieure d'Électricité.

L'École Supérieure d'Électricité

À l'origine de l'école en 1894, Mascart cherche un an plus tard un nouveau directeur. Il jette son dévolu sur Janet, nanti de ses faits d'armes à Grenoble et récemment nommé à l'université de la Sorbonne.

L'école met en place une scolarité d'une année, qui se rapproche plus d'une spécialisation que d'une véritable formation complète. Les programmes d'admission portent essentiellement sur les connaissances en mathématiques et en physique (auxquelles s'ajoutent des bases en dessins industriel et en chimie). Concernant la physique, on trouve la thermodynamique, l'optique, ainsi que les notions premières en électricité et magnétisme : « phénomènes fondamentaux, lois numériques de l'électrostatique, de l'électromagnétisme et de l'induction » sont les seuls concepts demandés dans le programme.⁹³

L'admission se fait sur concours, avec trois épreuves écrites (un problème d'électricité, une épreuve de dessin industriel, une autre de calcul logarithmique) et cinq épreuves orales (électricité, mathématiques, mécanique appliquée, physique-chimie, et calcul à la règle). Néanmoins beaucoup d'élèves peuvent bénéficier d'une dispense au concours. Ainsi, les anciens élèves de l'École Centrale (sur les liens entre École Centrale et ESE voir page 150), des Mines de Paris et de Saint-Étienne, des Ponts et Chaussées et de Polytechnique (pour cette dernière seuls les élèves français sont concernés) en sont dispensés. Les licenciés ès sciences possédant

93. ESE 1899.

les certificats de Mécanique rationnelle et de Physique générale sont également bénéficiaires de cette dispense, ainsi que les anciens élèves des Arts et Métiers sous réserves de notes suffisamment élevées. De plus, tous les anciens élèves des Arts et Métiers, les élèves diplômés de l'Institut industriel du Nord (à partir de sa création) et les élèves ayant obtenu le certificat de l'École Centrale bénéficient de points supplémentaires au concours.⁹⁴

Le déroulement de la scolarité s'organise autour de cours et conférences, de travaux pratiques et de visites d'industries. Deux cours réguliers sont professés à l'école. Le premier, « Électrotechnique générale », est le cours du directeur Janet. Le second cours sur les « Mesures électriques » est enseigné par Henri Chaumat, le sous-directeur de l'école. Ces deux cours représentent 70 leçons annuelles. Des conférences sont données par des ingénieurs, venant souvent des Arts et Manufactures. Elles sont de volume variable, de 3 à 23 leçons, et abordent les grands thèmes de l'électricité industrielle : calculs et propriétés de machines à courant continu ou alternatif, alternateurs, canalisations électriques souterraines ou aériennes, appareils divers (rhéostat, interrupteur, ...), éclairage électrique, télégraphie, etc. La formation vise vraiment à présenter un très large panel de tous les dispositifs électriques auxquels les élèves pourront être confrontés une fois sortis de l'école. Ces dispositifs sont également étudiés en travaux pratiques, par exemple dans des montages de mesures de résistances (pont de Wheastone, pont à fil, résistance d'une pile, ...).⁹⁵

L'orientation est donc mise de façon prononcée sur une approche pratique de l'électricité. Mais quelle est la place de l'électromagnétisme « théorique » dans l'enseignement de l'école ? Au niveau des enseignements, des « conférences complémentaires » (l'auteur du rapport précise que le sujet peut varier d'une année sur l'autre) abordent des sujets tels que « le Radium et la radioactivité de la matière », « la télégraphie sans fil », ou encore « les rayons cathodiques ; rayons X ». Dans le compte rendu des activités de l'école qu'il fait en 1904, Janet reprend les idées qui ont prévalu à la création de celle-ci. Il livre ainsi une véritable profession de foi en décrivant précisément ce qu'il souhaite de l'enseignement de l'électricité :⁹⁶

94. *Ibid.*

95. Janet 1904, p. 68-73.

96. *Ibid.*, p. 63. Les italiques sont d'origine. Grelon détaille les conférences pour l'année 1897-98 dans Grelon 1991, p. 837.

L'enseignement de l'École Supérieure d'Électricité est essentiellement pratique et a pour but la formation d'ingénieurs électriciens, c'est-à-dire d'hommes ayant les connaissances théoriques, le sens pratique et l'esprit critique qu'exige de plus en plus l'Industrie électrique moderne. Si le but à atteindre est ainsi parfaitement clair, les moyens à employer pour y arriver sont plus difficiles à établir, et la définition même du mot *pratique* est bien délicate à donner quand il s'agit de l'appliquer à l'enseignement : au sens strict du mot, il faudrait essayer d'enseigner aux élèves tout ce qu'ils auront à exécuter plus tard (intellectuellement ou matériellement), et rien que ce qu'ils auront à exécuter plus tard ; mais il semble bien que ce programme, peut-être séduisant à première vue, n'est et ne peut être qu'une utopie, parce que, le nombre des cas particuliers étant indéfini, un enseignement ne peut prétendre à les embrasser tous ; il faut donc suivre un programme, peut-être plus modeste en apparence, mais plus sûr en réalité, et prendre comme règle d'enseigner aux élèves la partie essentielle de ce qu'ils auront à exécuter tout en leur mettant entre les mains un outil assez puissant pour leur permettre de ne pas être embarrassés devant les cas imprévus que leur avenir industriel leur réserve ; cet outil, c'est l'enseignement général ou théorique ; mais de même que le mot *pratique*, le mot *théorique* peut avoir bien des sens différents, et il est clair, par exemple, qu'on ne l'entend pas de la même façon lorsqu'on l'applique à la théorie des électrons ou à la théorie de la machine dynamo-électrique. Nous sommes en droit, au moins provisoirement, d'écarter d'une école d'ingénieurs les théories purement spéculatives ; encore faut-il se souvenir qu'elles peuvent, du jour au lendemain, être appelées à jouer un rôle important dans la pratique : les oscillations électriques et les ondes électromagnétiques nous en fournissent un exemple éclatant [...].

Les comparaisons que donne Janet sont particulièrement éclairantes sur son rapport à l'électricité. Il tient ces propos en 1904 : la découverte de l'électron a été faite plusieurs années auparavant. Janet continue de considérer celle-ci — du moins « provisoirement » — comme « purement spéculative » et l'écarte de ses objectifs d'enseignement à l'école. Néanmoins, il est conscient des évolutions qui peuvent avoir lieu, avec le développement pratique de certaines de ces théories spéculatives, et prend pour exemple les ondes électromagnétiques. Bien qu'il ne donne pas explicitement d'application, le développement de la télégraphie sans fil dans les années antérieures, et sa présence dans le programme de conférence laissent à penser qu'ils fait référence à cette application particulière.

Dans le compte rendu qu'il fera en 1909, Janet dressera la liste des secteurs d'activité des

anciens élèves. Sur 768 diplômés depuis la fondation de l'école, on retrouve dans les secteurs les plus prisés : 247 ingénieurs dans des ateliers et maisons de construction, 89 dans l'armée, la marine, les télégraphes (officiers et ingénieurs), 83 dans des stations centrales, 51 dans l'enseignement et les laboratoires, et 50 dans les chemins de fer.⁹⁷

L'électricité dans les instituts

Avec ses enseignements d'électricité industrielle, Janet joue un rôle important dans la naissance de l'Institut Électrotechnique de Grenoble. Après le départ de Janet vers Paris en 1894, l'enseignement d'électricité est repris par Joseph Pionchon. Malgré quelques réticences des professeurs de sciences, l'université finit par mettre en place un enseignement officiel d'électricité industrielle, que le journal *L'Éclairage Électrique* met en avant :⁹⁸

L'université de Grenoble a pensé qu'il était de son devoir de seconder plus énergiquement le mouvement industriel dont elle avait été l'un des promoteurs, et elle a décidé « d'organiser à la faculté des sciences à partir de l'année scolaire 1898-1899 un enseignement complet, théorique et pratique, de l'électricité industrielle, offrant l'équivalent d'une véritable école d'électrotechnique ».

Lorsque l'auteur parle de « l'équivalent d'une véritable école d'électrotechnique », il fait directement référence à la toute nouvelle École Supérieure d'Électricité, puisque l'organisation mise en place à Grenoble ressemble fortement à l'école dont Janet est devenu le directeur. La scolarité se déroule sur trois ans, et se compose :⁹⁹

- D'un cours théorique biannuel avec deux programmes distincts, le cours pouvant commencer par l'un ou l'autre des programmes ;
- De travaux pratiques au sein du laboratoire d'électricité de la faculté de Grenoble, abordant « les mesures électriques et magnétiques usuelles », des « exercices d'étalonnage et de contrôles d'appareils industriels » et des poses de canalisations électriques. Des « conférences pratiques » sont également organisées, et les élèves s'exercent à la création de plans et de devis électriques ;
- De visites d'usines et installations à Grenoble et dans sa région ;

97. Janet 1909.

98. *EE*, XVI, 30 juillet 1898 (supplément p. XXXV), repris dans Grelon 1991, p. 821. L'auteur de la citation entre guillemets n'est pas identifié, elle est probablement tiré du programme d'enseignement.

99. *Ibid.*

- D'exercices de conduite de machines, à gaz et électriques pour le transport d'énergie et l'éclairage ;
- De stages facultatifs au sein des entreprises de la région.

Les études sont sanctionnées d'un « Brevet d'études électrotechniques ». L'institut d'électrotechnique de Grenoble est inauguré officiellement le 11 mars 1901, un an après les instituts de Nancy et de Lille.¹⁰⁰

Conclusion

Les premiers établissements à enseigner les théories électromagnétiques de l'éther naissent aux alentours de l'Exposition de 1881, avec l'École Supérieure de Télégraphie (1878), l'École Municipale de Physique et Chimie Industrielle (1882) et l'Institut Montefiore de Liège (1883). Ces « nouvelles écoles » choisissent dans leurs cours de s'affranchir des anciennes théories et de discuter les considérations plus récentes comme la théorie de Maxwell dès leur création. Sur ce point, il est important de constater que la seule considération des cours de physique ne suffit plus : les grandes lignes de ces théories sont abordées dans des cours d'électricité.

Les établissements plus anciens, comme le CNAM ou l'École Centrale, sont à l'image des écoles d'application et mettent du temps à intégrer officiellement l'électricité, bien que celle-ci soit présente depuis plusieurs années dans les cours de physique. Cependant les nouvelles théories n'y sont que peu évoquées. Les instituts électrotechniques qui voient le jour à la toute fin du XIXe siècle semblent constituer une deuxième vague d'établissements, ancrant solidement l'électricité dans l'industrie. Ils se développent dans des centres de province, avec un fort ancrage industriel (Lille, Grenoble, Nancy) et sont portés par une nouvelle génération d'enseignants, comme Paul Janet ou Bernard Brunhes, qui ont de bonnes connaissances des théories électromagnétiques mais choisissent parfois de s'orienter vers l'électricité industrielle.

100. Cet institut est à l'origine des écoles d'ingénieurs de Grenoble, aujourd'hui regroupées dans le Grenoble INP.

Conclusion de la deuxième partie

Le paysage institutionnel français connaît de larges changements à la fin du XIXe siècle. L'essor de l'électricité au niveau industriel, symbolisé par la tenue en 1881 de la première Exposition Internationale d'Électricité, pousse à la formation de compagnies électriciennes comme la Société Internationale des Électriciens. Au niveau de l'enseignement supérieur technique, de nouveaux établissements voient le jour, comme l'École Supérieure de Télégraphie, l'École Municipale de Physique et Chimie Industrielle et l'École Supérieure d'Électricité, et s'ajoutent aux écoles plus anciennes comme Polytechnique, ses écoles d'applications (Mines, Ponts et Chaussées, ...), le CNAM, ou Centrale.

L'étude du contenu des cours dispensés dans ces différents établissements permet d'identifier des catégories bien distinctes. Nous avons discuté les cours de physique et d'électricité donnés dans tous ses établissements, ainsi que les documents scolaires (comptes rendus de conseils, programmes d'enseignement) lorsqu'ils étaient conservés. Une première approche permettrait de donner une caractéristique commune, et presque évidente : chaque établissement enseigne la physique et l'électricité selon son objectif. Le CNAM oriente l'enseignement vers le côté appliqué, l'EST le dédie à la télégraphie, Centrale propose un enseignement généraliste, à l'inverse de l'ESE qui se concentre sur le côté purement technique. Polytechnique, qui conserve une vision axée sur la théorie et la physique mathématique, n'aborde pas l'électricité d'un point de vue pratique.

Mais en considérant les cours portant sur les théories électromagnétiques, ce schéma ne tient plus. S'il semble logique que l'EST aborde largement la théorie de Maxwell et ses conséquences pour la propagation, on constate que les cours donnés à l'EMPCI et à l'Institut Montefiore offrent un enseignement particulièrement poussé sur ces points. Les ingénieurs ou techniciens qui sortent de ces écoles, pourtant tournées vers l'industrie et d'un niveau moindre que l'EST, ont ainsi une idée de Maxwell et de l'éther bien plus précise que ne pourraient avoir les polytechniciens de la même année. Cette absence des nouvelles théories à Polytechnique est imputable tant à une inertie de l'institution qu'à une préférence marquée pour les concepts de la physique française du début du XIXe siècle. Les établissements comme le CNAM et Centrale peinent à aborder ces notions, par choix ou par méconnaissance, alors que l'ESE choisit nettement de ne pas considérer ces aspects théoriques.

Troisième partie
La diffusion des théories
électromagnétiques

Introduction de la troisième partie

Cette dernière partie a pour but de mettre en avant les différents supports expliquant, pour qui souhaiterait se former, les théories électromagnétiques de l'éther. Elle s'inscrit dans les mêmes objectifs que ceux de la deuxième partie : déterminer comment se transmettent les connaissances sur l'éther et les théories électromagnétiques. Nous avons choisi de regarder principalement les moyens de diffusion liés au domaine de la physique et à celui de l'électricité, qui ont à notre sens le plus de chances de publier des articles sur les points théoriques que nous avons évoqués jusqu'ici. Les supports que nous considérons sont d'ailleurs presque tous destinés à un public averti :¹⁰¹ ils ne sont que difficilement compréhensibles pour un lecteur n'ayant pas suivi de formation préalable, notamment d'un point de vue mathématique. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que dans le lectorat de ces articles nous retrouverons une majorité de personnes ayant suivi une formation au sein des écoles évoquées précédemment.

Nous avons principalement considéré des journaux et des bulletins de sociétés scientifiques. Étant donnée la multitude de journaux qui sont créés pendant cette période,¹⁰² il nous a fallu délimiter un ensemble de supports dans lesquels nous pouvions trouver les publications pertinentes. Une première approche basée sur la table des matières nous a permis de distinguer les journaux publiant des articles sur les théories électromagnétiques (*Journal de physique*, *Revue général des sciences pures et appliquées*, ...), de ceux qui n'en contiennent pas, comme les journaux plus généralistes (journal *La Nature*) ou destinés à un autre domaine de l'industrie (journal *Le Génie civil*).¹⁰³ Évoquons dès maintenant le cas des écrits d'Henri Poincaré, dont les ouvrages seront considérés comme des supports de diffusion, y compris pour les cours donnés à la Sorbonne, car c'est par leur large diffusion qu'ils vont pouvoir être accessibles à un lectorat notamment de techniciens et d'ingénieurs.¹⁰⁴

Outre la possibilité de distinguer les journaux, l'étude détaillée du contenu des articles offre un autre avantage : celui d'identifier, pour un même journal, les tendances d'évolution. Certains journaux présentent en effet des changements majeurs au cours de la période 1880-1900, mais qui ne sont pas reflétés par les titres des articles présentés dans la table des matières. Il est donc nécessaire de s'intéresser au contenu des articles, en regardant les différents points qui y sont détaillés, les théories auxquelles les auteurs font référence, le niveau mathématique,

101. Dans son ouvrage sur la science populaire, Bernadette Bensaude-Vincent distingue la littérature « ésotérique » destinés aux initiés, de la littérature « exotérique » relevant de ce qui était désigné comme la vulgarisation (voir : Bensaude-Vincent et Rasmussen 1997, p. 13).

102. Période que Bernadette Bensaude-Vincent de « l'âge d'or de la diffusion », voir : *Ibid.*

103. Sur les journaux de « vulgarisation » voir : Bensaude-Vincent et Rasmussen, op. cit. et Béguet 1990.

104. Sur la diffusion des ouvrages de Poincaré voir : Rollet 1996.

etc. Dans le cas du journal *La Lumière Électrique*, cette démarche permet de mettre en lumière une transformation progressive d'un journal d'électricité vers un véritable journal de physique sous l'influence de quelques acteurs. Concernant le contenu des articles, le *Bulletin* de la Société Internationale des Électriciens constitue un cas particulièrement intéressant de revue publiant quelques articles rédigés pour expliquer des théories électromagnétiques spécifiquement à des ingénieurs en électricité.

Le chapitre 9 aborde l'ensemble des supports, qu'ils soient orientés vers la physique ou vers l'électricité, en mettant en avant les choix éditoriaux de chacun. Les articles détaillant des points particuliers sur les théories électromagnétiques et l'éther seront évoqués, sans être tous discutés dans le détail. Le chapitre 10 traite plus particulièrement du journal *La Lumière Électrique*, pour lequel nous montrerons que la ligne éditoriale évolue de façon étroitement liée avec le contexte social (Exposition de 1881, crise politique...). Cette étude permet de montrer l'émergence, dans la diffusion des théories électromagnétiques, d'un « groupe Sorbonne » autour de la figure d'Henri Poincaré. Les travaux de ce dernier font l'objet du chapitre 11, dans lequel nous nous attarderons sur la place de l'éther dans les principaux ouvrages de Poincaré. Enfin, le chapitre 12 est consacré à Alfred Liénard, qui représente une spécificité incontournable de notre propos, car il regroupe toutes les facettes que nous avons évoquées : formation classique d'un ingénieur des corps de l'État, enseignement dans des établissements supérieurs, mission en tant qu'ingénieur, et recherche sur les théories électromagnétiques. Nous y proposons une analyse critique des articles que Liénard a publié sur la période 1890 - 1900, oscillant entre diffusion des connaissances et recherche scientifique.

Chapitre 9

Tout l'échafaudage de nos spéculations peut n'être que mensonge : du moins nous a-t-il permis d'atteindre et de saisir la vérité.

Gustave Séligmann-Lui

Journaux, ouvrages et bulletins

Jusqu'en 1895, la théorie électromagnétique de Maxwell n'est enseignée, au moins en partie, que dans un nombre restreint d'établissements de formation supérieure.¹ Les nouvelles théories n'y sont, de leur côté, jamais étudiées. Pour prendre connaissance de l'évolution des travaux en électromagnétisme, avec les théories de Hertz, Lorentz ou Larmor, ou pour se former à la théorie de Maxwell il est donc nécessaire de se tourner vers des supports de diffusion scientifiques, qui regroupent les journaux, les bulletins de sociétés scientifiques, les ouvrages et les expositions et congrès. Ce chapitre vise à donner les principaux supports qu'un lecteur français peut utiliser pour obtenir des informations sur les théories électromagnétiques ou sur l'éther.

La première partie aborde les supports scientifiques généraux ou orientés vers la physique comme le *Journal de Physique*, le *Bulletin de la Société Française de Physique* et la *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées*. On y trouve régulièrement des articles et des notes évoquant éther et électromagnétisme ; nous ne chercherons donc pas à faire une description approfondie de ces articles et nous donnerons uniquement quelques exemples. Une comparaison avec des revues dédiées à l'électricité, dans la deuxième partie de ce chapitre, montre une large différence dans les approches choisies. Ces revues, comme *L'Électricien*, qui se concentrent sur l'aspect pratique de l'électricité, laissent le plus souvent de côté les aspects théoriques. Ces derniers apparaissent principalement au travers des notes et comptes rendus de sociétés scientifiques. La dernière partie traite plus particulièrement de la Société Internationale des Électriciens, et des deux principaux moyens de diffusion qu'elle utilise : le *Bulletin*, et l'organisation d'expositions.

1. L'année 1895 est prise comme date limite, à partir de laquelle Becquerel, qui occupe l'une des deux chaires à l'École Polytechnique, enseigne tous les ans une partie sur la théorie de Maxwell.

9.1 La physique dans les journaux

Le Bulletin de la SFP et le Journal de Physique

Parmi les organismes qui publient le plus d'articles en lien avec la physique, on retrouve bien évidemment la Société Française de Physique (abrév. SFP) et le *Journal de Physique*. La SFP est créée en 1873, et ses statuts sont rédigés par cinq personnes :² Alfred Cornu, professeur de physique à Polytechnique que nous avons déjà rencontré, Charles d'Almeida, Jean-Baptiste Gernez, qui deviendra professeur à l'École Normale Supérieure de Sèvres en 1882, Antoine Lissajous, enseignant en classes préparatoires et (déjà) Éleuthère Mascart, que nous avons également évoqué pour son rôle quelques années après dans le Congrès des Électriciens, puis dans la création du Laboratoire Central d'Électricité. La SFP publie les articles par l'intermédiaire du *Bulletin de la Société Française de Physique*, qui paraît dès la création de celle-ci. Le *Bulletin* est d'ailleurs en lien étroit avec une autre revue : le *Journal de Physique Théorique et Appliquée* (que nous abrègerons en *Journal de Physique*). Fidèle à « une vision d'une science collective englobant l'ensemble du territoire français », Charles d'Almeida avait lancé ce journal un an avant la création de la SFP. Les deux revues partagent régulièrement des articles : le journal ne publie que des textes scientifiques, alors que le bulletin rend également compte des séances de la Société. Mais les articles publiés dans le bulletin sont, sauf exception, également présents dans le journal.³

L'éditorial du premier numéro est un plaidoyer de d'Almeida pour une diffusion large de la science :⁴

[Le journal s'adresse] aux Professeurs de Physique, surtout aux isolés, qui, privés des ressources que les bibliothèques devraient leur fournir, gémissent de ne pouvoir développer leurs connaissances et de ne savoir où porter leurs efforts. [Il s'adresse] aussi aux hommes de toute profession scientifique : industriels, ingénieurs, militaires, médecins et autres qui ne peuvent, sans déchoir, oublier une science conseillère de leurs travaux et qui doivent se souvenir que les Physiciens les plus illustres sont sortis de leurs rangs.

Dans la liste des collaborateurs au journal pour la première année, on retrouve bien sûr Cornu, mais également Jules Jamin, professeur à Polytechnique, son successeur Alfred Potier, alors

2. Sur la création de la SFP voir : Bustamante 2005 et Matiz 2004.

3. Sur les liens entre le *Journal de Physique* et le *Bulletin de la SFP* voir : Matiz 2004, p. 78.

4. *JdP* 1872, p. 5-6.

ingénieur des Mines, ou encore Jules Violle, jeune docteur ès sciences qui obtiendra plus tard la chaire de physique du CNAM (voir chap. 6 pour Jamin et Potier, chap. 8 pour Violle). Ernest Mercadier, ingénieur des Télégraphes, rejoint cette liste l'année suivante.⁵ De 1872 à 1900, le journal demeure un mensuel, mais la longueur d'un numéro varie largement. De 33 pages en moyenne en 1872, elle atteint près de 60 pages en 1897. Il arrive également que la longueur d'un numéro soit différente pour une même année : par exemple, sur l'année 1897, le numéro de novembre fait 96 pages, celui de décembre 38 pages.⁶

Pour un lecteur régulier du *Journal de Physique*, la question de la diffusion à propos de l'éther ou des théories électromagnétiques ne se pose pas : entre 1872 (date de création) et 1901, on trouve dans chaque volume annuel un ou plusieurs articles portant sur l'entraînement partiel de l'éther (en optique et en électromagnétisme), sur la théorie de Maxwell ou, à partir de leur réalisation, sur les expériences de Hertz.⁷

Le premier article traitant de l'entraînement de l'éther lumineux qui paraît dans le *Journal de Physique* est dû à Alfred Potier, en 1876. Potier y donne une démonstration pour la formule d'entraînement partiel de Fresnel,⁸ en supposant que dans un milieu transparent l'éther libre (le même que dans le vide) transmet la force, et que l'éther condensé (la fraction d'éther supplémentaire due au milieu) n'intervient que par sa densité, et non par son élasticité, c'est-à-dire intervient uniquement par son inertie et sans agir sur la force. Le raisonnement de Potier n'est valable que pour des mouvements périodiques de l'éther.

Ce raisonnement autour de l'éther lumineux perdure assez longtemps dans les revues françaises, puisqu'un article de Georges Foussereau, professeur de physique en classes préparatoires, paraît en avril 1892 dans le *Journal de Physique* et en janvier 1895 dans le *Bulletin de la SFP*. Foussereau, qui reprend un titre similaire à celui de l'article de Potier, propose une nouvelle démonstration étendue à tout type de mouvement.⁹ Parmi les autres articles sur l'éther, on peut citer l'article de Michelson et Morley « Influence du mouvement du milieu sur la vitesse de la lumière », celui de Mascart « Modifications qu'éprouve la lumière par

5. *JdP* 1872, p. 1 et *JdP* 1873.

6. *JdP* 1897. Moyenne réalisée sur les volumes de l'année 1872 et 1897, sans compter la table des matières. Une étude détaillée des deux numéros de novembre et décembre 1897 n'a pas mis en évidence de faits ou de manifestations majeurs justifiant un volume exceptionnellement long.

7. Dans le registre de table sont référencés sur la période 1872-1901 : 35 articles, mémoires et notes sur l'entraînement partiel de l'éther (en optique et en électromagnétisme), 48 traitant de la théorie électromagnétique de la lumière, dont 44 à partir de 1882 (2^e série du journal), 47 sur les expériences de Hertz (uniquement pour l'aspect expérimental) à partir de 1889 et une vingtaine pour la théorie qui s'y rapporte. Voir : *JdP* 1901, p. 79-80 ; 148-51.

8. Potier 1876.

9. Voir : Fousereau 1892.

suite du mouvement de la source et du mouvement de l'observateur », et plusieurs articles de Lodge.¹⁰

Alfred Potier est également présent si l'on évoque les articles traitant des idées de Faraday et Maxwell. Celui qu'André Blondel, ancien élève de Polytechnique (X 1883), considère comme « le champion de la théorie de Maxwell en France » (voir 6.1 p.159) en publie deux dès l'année 1873. Son premier article, « Sur l'électrodynamique et l'induction » aborde surtout les calculs d'électrodynamique dus à Ampère et Laplace. Sur la description qu'il donne du phénomène d'induction, Potier annonce préférer « la géométrie à l'analyse, ce qui [lui] permettra d'introduire la notion des lignes de force, de Faraday dont l'emploi simplifie considérablement les énoncés relatifs à l'induction », mais c'est en fait le seul passage où il mentionne ces lignes de force, dans le reste de son exposé il leur préfère les expressions analytiques.¹¹

Le second article de Potier, « Égalité des constantes numériques fondamentales de l'optique et de l'électricité » est bien plus centré sur la théorie de Maxwell.¹² Potier commence par donner quelques mesures expérimentales de la vitesse de la lumière (par Fizeau et Foucault) et du rapport des unités électromagnétique et électrostatique (par Weber, Thomson, puis Maxwell), et il remarque la proximité de ces deux valeurs. Il se donne pour objectif explicite d'exposer « la marche suivie par M. Maxwell dans son important *Traité d'Électricité et de Magnétisme* », autour de deux points.

Sa première partie traite du rôle des diélectriques. Potier donne l'hypothèse des courants de déplacement, en utilisant l'analogie mécanique d'un ressort soumis à une force extérieure, et introduit la notion de déplacement électrique. Il enchaîne avec la proportionnalité du déplacement électrique et de la force électromotrice, ainsi que la nature de ce coefficient de proportionnalité ϵ .¹³ Sur la signification de ϵ , Potier donne les deux hypothèses sur la nature du milieu intermédiaire : soit un milieu polarisable type Mossotti (voir 11.2 p. 346), avec des cellules séparées par une substance inpolarisable, soit un fluide uniforme polarisable, qu'il juge plus proche des idées de Faraday. Dans ce cas, le déplacement n'est d'après lui « que l'expression mathématique » de cette polarisation. Il conclut sur ce point avec la condition d'incompressibilité de ce fluide, qui est la même que « celle que Fresnel a dû attribuer à l'éther lumineux ». ¹⁴

10. Voir : JdP 1901, p. 79-80.

11. Potier 1873 (a).

12. Potier 1873 (b)

13. Potier le note k

14. *Ibid.*, p. 382-3.

Sa seconde partie démontre les relations du champ de Maxwell, liant les trois quantités suivantes : \mathbf{J} le courant total, \mathbf{H} la force magnétique et \mathbf{A} le potentiel vecteur. De ces équations, il déduit l'équation de propagation pour le potentiel vecteur. Il termine :¹⁵

Or ces équations sont précisément celles [...] auxquelles doivent satisfaire les petits mouvements d'un milieu élastique incapable de propager des ondes longitudinales, et dans lequel des ondes transversales sont propagées avec une vitesse V . L'identité de la vitesse de la lumière et du rapport des deux unités électriques montrerait donc que les déplacements hypothétiques de l'éther lumineux et ceux du fluide spécial, qu'on a supposé l'agent des manifestations électriques dans le vide, sont soumis aux mêmes lois. Les vibrations lumineuses ne seraient autre chose que des déplacements ou des courants électriques changeant rapidement et périodiquement de sens. La détermination rigoureuse de ces deux vitesses ne saurait donc être poursuivie avec trop de soins et par trop de procédés divers.

Ce premier article sur Maxwell, publié peu de temps après la publication du *Treatise* (et bien avant sa traduction) reflète bien le rôle de revue de recherche du *Journal de Physique* : Potier expose des idées récentes, en justifiant l'intérêt qu'on peut leur porter, mais emploie le conditionnel à plusieurs reprises. Les notions principales de Maxwell (rôle des diélectriques et déplacement électrique) sont présentes, même si l'importance du champ n'est pas spécialement mise en avant.

Les articles qui portent exclusivement sur la théorie de Maxwell sont en fait peu présents, et se concentrent surtout sur des points particuliers de cette théorie. On peut notamment citer l'article du physicien allemand Leo Graetz publié dans les *Wiedemann's Annalen* en 1886 « Grandeur des tourbillons moléculaires de Maxwell et densité de l'éther lumineux », dont Edmond Bouty fait une note dans le *Journal de Physique*, l'article de Potier en 1894 « Sur la propagation de l'électricité le long des conducteurs » (théories de Maxwell et de Weber), ou celui de 1896 d'Aimé Vaschy « Nature du courant de déplacement de Maxwell ». En pratique, aucun article ne propose un exposé précis de la théorie de Maxwell dans sa globalité, qui serait accessible à des lecteurs découvrant ces idées pour la première fois.¹⁶

Les théories plus récentes de l'électrodynamique sont régulièrement traitées : les travaux de Heaviside, Hertz, Lorentz ou Larmor apparaissent à plusieurs reprises. Si ces théories

15. *Ibid.*, p. 388

16. Les articles mentionnés sont : Bouty 1886, Potier 1894, Vaschy 1896, voir aussi pour les références des articles : table par noms d'auteurs dans *JdP* 1901, pp. 1*-157*.

récentes sont publiées, c'est essentiellement par l'intermédiaire des revues étrangères. On retrouve principalement les *Proceedings* de la *Royal Society* et le *Philosophical Magazine* côté britannique, les *Wiedemann's Annalen* en Allemagne, et les *Archives néerlandaises* pour les travaux de Lorentz. Ainsi, dès 1885, un article de Hertz publié dans les *Wiedemann's Annalen* portant sur l'électrodynamique de Maxwell, est traduit dans le *Journal de Physique*. Dans les premiers numéros, ces références des publications étrangères sont dispersées dans le journal. À partir de 1884, elles commencent à être classées, et sont souvent faites par les mêmes auteurs, en particulier Edmond Bouty, jeune enseignant dans le secondaire qui deviendra professeur à la faculté de Paris, et Bernard Brunhes, préparateur à la Sorbonne.

Sur tous ces points, on retrouve la ligne éditoriale à laquelle on peut s'attendre de la part d'un *Journal de Physique* : il ne s'agit pas de publier des articles d'explications, voire de vulgarisation, mais bien de donner les références sur les travaux les plus récents. Un lecteur bien au fait de ces théories peut alors suivre les évolutions et les divers résultats expérimentaux. À l'inverse, un lecteur qui chercherait simplement à se former sur ces théories et à en apprendre les bases aurait bien du mal à apprivoiser cette littérature de haut niveau.

Parmi les publications du *Bulletin* qui ne se trouvent pas dans le *Journal de Physique*, on trouve les comptes rendus des séances, mais également les comptes rendus des autres manifestations de la SFP. Ainsi le Congrès de physique de 1900, qui se tient du 6 au 12 août (à l'occasion de l'exposition universelle) y est largement détaillé. Les secrétaires de la Société, Lucien Poincaré, professeur à l'École Normale Supérieure de jeunes filles à Sèvres, et Charles-Édouard Guillaume, physicien au Bureau International Des Poids et Mesures, également à Sèvres, et qui obtiendra le prix Nobel en 1920 (voir Annexe n°6 pour des précisions), sont cités comme les gestionnaires principaux (Guillaume est d'ailleurs secrétaire officieux, puisqu'il n'apparaît pas dans les postes officiels de la SFP, mais il est considéré comme tel dans le discours de clôture du président de la SFP).¹⁷

La Revue générale des sciences

À partir de 1890, une nouvelle revue scientifique paraît. Il s'agit de la *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées*, journal bimensuel publié par Louis Olivier, « docteur ès sciences » comme il se présente lui-même, ayant commencé une carrière de chercheur en biologie avant de se tourner vers la diffusion scientifique. Parmi les contributions aux publications, on trouve assez peu de ce que la *Revue* présente comme des « articles originaux » : de 1890 à

17. Les conférences tenues lors du Congrès seront néanmoins imprimées dans trois volumes spéciaux du *Journal de Physique*. Voir Langevin J. 1972, p. 3.

1900, dans les domaines qui sont régulièrement abordés, il n'y a que 2 à 3 articles originaux par numéro (donc toutes les deux semaines). À titre de comparaison, dans le journal *La Lumière Électrique*, on retrouve 4 à 5 articles originaux par semaine.

Cependant, et bien qu'ils ne soient pas si nombreux, ces articles comptent pour une part importante. Dans la table des matières de la revue, les articles originaux sont signalés en caractères gras. Pour l'année 1895, ils représentent un volume d'environ 792 pages, sur les 1108 qui constituent le journal.¹⁸ Parmi les auteurs réguliers de ces articles sur la dernière décennie du siècle, on retrouve Charles-Édouard Guillaume et Lucien Poincaré, déjà mentionnés ci-dessus, ou le chimiste Henri Le Chatelier.¹⁹

Regardons dans le détail la répartition de ces articles. Sur la première décennie de la *Revue*, le domaine le plus abordé est la chimie, avec 16,5%, suivi de l'ensemble « géographie-géologie-paléontologie » avec 16,2% (qui regroupe également les articles de « colonisation » à partir de 1897). La physique, avec 12,6%, et l'ensemble « chirurgie-médecine-hygiène-microbiologie » avec 11,7% sont également très présents. Les autres domaines régulièrement classés sont : la physiologie (10,7%), la « mécanique appliquée et génie civil » (9,1%), les ensembles « agronomie-botanique » (7,8%) et « anatomie-zoologie » (6,0%), enfin les mathématiques (tous domaines confondus : algèbre, analyse, arithmétique, mais également hydrodynamique) (5,0%) et « astronomie-météorologie » (4,3%).²⁰ Ponctuellement, on retrouve certains articles portant sur l'histoire des sciences (uniquement en 1890), sur l'enseignement,²¹ ou simplement désignés comme « divers ».

Parmi les articles originaux de physique, peu traitent des théories électromagnétiques. Sur la période étudiée, un seul ressort, que nous allons détailler : il s'agit un article de René Blondlot (alors professeur adjoint à la Faculté de Nancy), publié en mai 1891, et intitulé « la théorie électromagnétique de la lumière ».²² Blondlot y établit les équations de Maxwell, en utilisant uniquement les lois expérimentales connues de l'électricité. Dans son introduction,

18. RGSPA 1895. Moyenne effectuée en prenant en compte, pour chaque article signalé comme original, la page initiale et la page finale, et en considérant que la moitié des articles mentionnés (100 au total) commencent et terminent en milieu de page.

19. Henri Le Chatelier (1850-1936), est resté célèbre pour ses travaux sur les équilibres chimiques, en particulier pour le principe éponyme.

20. Statistiques effectuées sur les volumes I à XI (except. II, IV et VII non disponibles) en comptabilisant les entrées dans la table des matières dans la catégorie « Articles originaux » pour les domaines classés dans tous les volumes. L'entrée « Revue annuelle » n'est pas comptabilisée.

21. La catégorie « enseignement » apparaît à partir de 1897, et regroupe des articles sur la naissances des instituts techniques dans les universités, ou l'enseignement d'une nouvelle matière dans un établissement donné.

22. Blondlot 1891

il explique :²³

La théorie électromagnétique de la lumière, due au génie de C. Maxwell, a reçu des brillantes expériences de M. Hertz, qui en ont semblé une confirmation, un regain de notoriété. Toutefois, nombre de personnes, effarouchées par l'appareil mathématique qui entoure l'exposé de Maxwell, reculent devant l'étude de sa théorie, malgré tout leur désir d'en connaître quelque chose de plus que le nom. Les pages qui suivent ont été écrites dans le but de les aider à se mettre au courant de ce chapitre récent de la physique ; le lecteur est supposé connaître les lois expérimentales des phénomènes électriques et posséder les notions les plus élémentaires du calcul infinitésimal.

Blondlot détaille dans un premier temps l'hypothèse des courants de déplacement de Maxwell. Pour cela, il utilise régulièrement la notion d'électricités positive ou négative, la première étant « là où l'état de déplacement commence », la seconde « là où l'état de déplacement cesse ». Ce recours à une notion qui n'est pas présente chez Maxwell nous semble caractéristique d'une diffusion faite pour un public continental, en particulier français, habitué aux concepts d'électricités positive et négative. La description du déplacement de Maxwell est dans ce cas retournée, la charge devenant prédominante sur la polarisation. Blondlot souligne néanmoins qu'« en réalité la charge appartient plutôt à la surface du diélectrique qu'aux conducteurs eux-mêmes ».²⁴

Le deuxième point de l'article est l'établissement des équations de Maxwell pour le champ à partir des lois expérimentales d'Ampère pour les courants et de la loi d'induction. Ces équations sont simplement définies par Blondlot comme « des relations qui existent pour chaque point du champ entre les valeurs de certaines quantités physiques en ce point », analogues aux équations reliant les grandeurs (pression, vitesse, ...) pour la description des ondes sonores. À aucun moment il ne parle d'éther ou d'un quelconque milieu intermédiaire. Dans le dernier point de l'article, il établit l'équation de propagation pour une onde transverse, dont il donne la vitesse de propagation. Il donne également la relation de Maxwell entre l'indice de réfraction et la permittivité diélectrique du milieu.

Cet article de Blondlot, qu'il destine explicitement aux personnes ne maîtrisant pas « l'appareil mathématique » est clairement un article ayant pour visée d'exprimer les équations de Maxwell à partir des connaissances de bases en électricité, connaissances que possèdent tous

23. *Ibid.*, p. 289.

24. *Ibid.*, p. 290.

les ingénieurs dans ce domaine. Les concepts propres à Maxwell, comme le déplacement électrique ou le rôle du milieu, sont expliqués, mais en essayant de se rapporter dans une large mesure aux notions connues du lecteur.

Si les articles originaux sont finalement peu présents, c'est également parce que la *Revue générale des sciences* porte bien son nom de « *Revue* », et s'attèle largement à donner des références extérieures. Dès sa création, elle propose des notes rapportées de nombreuses sociétés scientifiques, bien sûr à Paris mais également à Londres, Berlin, Amsterdam, Édimbourg ou Vienne, et dans les différents domaines auxquels la *Revue* s'intéresse (physique, chimie, physiologie, mathématique, biologie); en 1895, 13 sociétés sont ainsi mentionnées dans la table des matières.²⁵

Surtout, ces notes sont en général bien détaillées et permettent de donner une idée précise des théories auxquelles les savants se réfèrent. Dès 1892, des travaux importants sur l'éther apparaissent dans la *Revue*, dans plusieurs de ces comptes rendus. Dans une séance du 27 mai de la Société de Physique de Londres, Oliver Lodge donne un exposé historique des liens entre éther et matière.²⁶ Le compte rendu de cette séance dans la revue, traduit depuis la note originale de Lodge, est publié dans le numéro du 30 juin 1892. Particulièrement clair, ce compte rendu, que nous allons détailler, donne une très bonne idée des évolutions successives liées aux expériences.

Dans sa présentation, Lodge commence par rappeler le phénomène d'aberration, et l'expérience du prisme d'Arago afin de mettre en évidence un éther immobile dans l'espace. Des expériences similaires de Maxwell, utilisant un spectroscope, répétées plus tard par Mascart, furent toutes négatives, et amenèrent à penser que l'éther était au repos par rapport à la Terre. Lodge rappelle également l'hypothèse de Fresnel, selon laquelle c'est la surdensité d'éther située dans un corps pondérable qui est entraînée avec ce corps, hypothèse vérifiée par l'expérience de Fizeau mettant en évidence l'effet de l'eau en mouvement sur la lumière. L'hypothèse d'un éther stationnaire par rapport à la Terre semble confirmée par l'expérience de Michelson, mais les expériences de Lodge utilisant les disques tournants ne mettent en évidence aucun entraînement de l'éther par la matière (voir 4.4 p. 120). Lodge rappelle sur ce point l'hypothèse de son camarade maxwellien, FitzGerald, selon lequel la taille d'un corps peut être fonction de sa vitesse dans l'éther. Cette note est donc un rappel net et précis de toutes les principales vues historiques sur l'éther et des expériences associées, y compris les plus récentes puisque Lodge évoque ses propres expériences, réalisées en 1891.

25. RGSPA 1895, p. 1114-6.

26. RGSPA 1892 (a). La note publiée dans la revue est une traduction directe de la note originale : Lodge 1892.

La contraction que propose FitzGerald pour expliquer les résultats des expériences pour les corps en mouvement trouve écho dans les contributions d'un autre physicien. En effet, les travaux de Hendrik Lorentz apparaissent dans plusieurs de ces comptes rendus, au sein de notes relatives à deux séances de l'Académie des Sciences d'Amsterdam. Ces notes, comme celle sur la présentation de Lodge, paraissent dans le volume de l'année 1892 de la *Revue*. La première séance, en date du 24 septembre, aborde la réflexion d'une onde par un corps en mouvement d'après la théorie de Maxwell. Elle est résumée dans la *Revue* dans le numéro du 15 octobre. Dans la seconde séance, datée du 26 novembre et présentée dans le numéro du 15 décembre, Lorentz présente son mémoire paru dans les *Archives néerlandaises* la même année. L'auteur de la note (le nom des rapporteurs n'est pas toujours précisé dans la revue) reprend les résultats de l'expérience de Michelson et Morley de 1888, et montre dans quelle mesure la théorie de Lorentz permet d'expliquer ces résultats, en supposant que les forces entre les particules chargées de la matière viennent agir sur la longueur respective des bras de l'interféromètre.²⁷

Avec ces notes de sociétés, les principales avancées — théoriques ou expérimentales — sur la question de l'éther sont compréhensibles par un lectorat, même peu à l'aise avec les mathématiques. Les idées de Lodge, FitzGerald ou Lorentz sont présentes, mais la théorie de Larmor reste cependant absente (voir chap. 3 pour Lodge et FitzGerald, chap. 4 pour Lorentz et Larmor). Ces notes et comptes rendus de sociétés scientifiques représentent ainsi un raccourci particulièrement précieux pour un lecteur qui ne souhaite pas se plonger dans les comptes rendus « officiels » des académies. Ils permettent, par exemple, de ne pas avoir à consulter les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (abrév. CRAS), qui sont d'un niveau plus exigeant. D'autre part, consulter ces rapports via la revue permet de ne regarder que les domaines qui intéressent.

Néanmoins, même résumés au sein de la revue, ces comptes rendus sont assez précis, et parfois difficiles à suivre pour un lecteur, surtout s'il est peu assidu. La *Revue générale des sciences* propose donc chaque année une « Revue annuelle » dans les différents domaines que nous avons énumérés plus haut, sorte de bilan accessible à tous. La revue annuelle de physique est faite par le professeur de physique aux Ponts et Chaussées Charles-Marie Gariel de 1890 à 1895, puis par Lucien Poincaré à partir de 1897. Elle est l'occasion de promouvoir les travaux les plus récents. Elle n'apporte pas de description poussée ni mathématique d'une théorie particulière, mais elle permet de rappeler certaines notions importantes. Ainsi, dans la revue annuelle de 1892, Gariel revient sur des expériences faites par Henri Pellat de mesure

27. RGSPA 1892 (b).

du rapport des unités électromagnétique et électrostatique (voir page 292), et rappelle à cette occasion les prédictions de la théorie de Maxwell et les résultats correspondants de Hertz sur la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques.

Autre grande catégorie que propose la *Revue*, les comptes rendus de différents congrès peuvent apporter certaines informations sur les avancées des sciences, mais dépendent très largement de l'auteur. Il arrive que des sujets soient expliqués plus longuement, c'est notamment le cas dans la présentation du Congrès de physique de 1900, présentation faite par Lucien Poincaré et Charles-Édouard Guillaume, les deux secrétaires de la SFP. Au cours de cette présentation de quelques pages, ils détaillent les grandes interrogations de la physique qui seront abordées lors du congrès : cohérence des unités, physique des gaz, physique moléculaire, liens entre rayonnement et matière, etc. De tous ces domaines, ils concluent :²⁸

Si de la comparaison entre les résultats de si beaux efforts faits dans tant de directions différentes pouvait résulter une synthèse, il semble bien qu'elle devrait être une soudure entre les travaux qui sont venus nous renseigner sur la matière et ceux qui, au contraire, nous apprennent de mieux en mieux quelle doit être la constitution de cet éther qui transmet les actions lumineuses, calorifiques et électriques. Ce sont les relations qui existent entre l'éther et la matière qui paraissent encore mal connues, et ce sont précisément ces relations qui paraissent devoir expliquer la plupart des phénomènes qui restent encore mystérieux.

Cet article, qui représente une énumération des principales questions de la physique en 1900, n'est pas présent dans le *Bulletin de la SFP*, qui propose des publications plus détaillées et bien que les auteurs soient les secrétaires de la société en question. Il apparaît donc possible pour un lecteur de recouper les différentes sources pour obtenir des informations différentes, selon le niveau de connaissances qu'il possède sur un sujet.

Les ouvrages

La dernière catégorie des publications que l'on trouve dans la *Revue* constitue une ressource importante pour des lecteurs qui souhaitent compléter leurs connaissances sur un domaine particulier : il s'agit des bibliographies. On trouve dans tous les journaux scientifiques de l'époque des brèves sur la sortie d'ouvrages, mais la *Revue générale des sciences* est particulièrement intéressante car les descriptions qu'elle fait de ces ouvrages sont assez

28. Poincaré et Guillaume 1900, p. 669.

bien détaillées. Si ces descriptions sont souvent — à tort ou à raison — élogieuses, un lecteur cherchant à se procurer un livre dans un domaine précis saura exactement à quoi s'en tenir avec les résumés proposés.

Utilisons la même démarche que les ingénieurs de l'époque, et basons-nous sur les résumés donnés par la *Revue* pour donner les principales références dans le domaine de l'électricité et du magnétisme. En premier lieu, on retrouve différents cours que nous avons évoqués : les *Leçons* professées à l'Institut Montefiore par Éric Gérard (1890), le *Traité élémentaire d'énergie électrique* d'Édouard Hospitalier, professeur à l'EMPCI (1890), les *Leçons de physique générale* de Louis Chappuis, professeur à Centrale, et Alphonse Berget (1892) le *cours d'Électricité* d'Aubusson de Cavarlay à l'École du Génie maritime (1899), et les *Leçons d'électrotechnique générale* de Janet à l'École Supérieure d'Électricité (1900), cours que nous avons déjà détaillés (voir 7.2 pour les cours du Génie Maritime, chap. 8 pour les autres), ainsi que les cours de Poincaré à la Sorbonne, qui feront l'objet d'une description particulière dans un chapitre suivant.

D'autres cours et traités sont référencés. Les *Leçons d'Électricité et de Magnétisme* de Pierre Duhem (1891) font l'objet d'une revue de Charles-Édouard Guillaume, revue séparée en trois parties, correspondant aux trois volumes de l'ouvrage de Duhem. Dans sa revue, Guillaume met l'accent sur le côté théorique des travaux de Duhem, qui propose une description thermodynamique des phénomènes liés à l'électricité et au magnétisme, ainsi que son côté novateur. Pour lui, « la réunion dans un même volume de phénomènes hétérogènes en principe est motivée par la méthode mathématique, à laquelle l'ouvrage est subordonné », au sein d'un ouvrage caractérisé par « beaucoup de hardiesse et d'indépendance ». Il souligne dans sa conclusion que « l'ouvrage est de la théorie pure ».²⁹

Un lecteur peu enclin à se lancer à l'abordage d'un tel ouvrage théorique préférera probablement se tourner vers un traité plus classique, comme les *Leçons sur l'Électricité et le Magnétisme* d'Éleuthère Mascart et Jules Joubert. Le premier volume de l'ouvrage, dont la première édition date de 1881, est réédité en 1897, et fait également l'objet d'une revue de Guillaume. Celui-ci commence par rappeler l'importance de la première édition, « le bel ouvrage qui a élevé toute une génération d'électriciens, tant en France qu'à l'Étranger, puisque leurs *Leçons* ont été traduites en plusieurs langues », et son contexte de parution, au sortir de l'Exposition Internationale d'Électricité. Surtout, Guillaume rappelle les changements immenses qui ont affecté le domaine de l'électricité pendant les quinze années qui suivirent, et mentionne la vérification expérimentale des idées de Maxwell par Hertz ainsi que les dévelop-

29. Guillaume 1892 (a). Sur les écrits de Duhem nous renvoyons le lecteur à la thèse de Paulo Coelho Abrantès (Coelho Abrantès 1885).

pements de l'industrie. Il insiste d'ailleurs sur la présence sous-jacente de celle-ci : « si je fais ici allusion à l'industrie, dont il n'est nullement question dans ce premier volume, c'est qu'on en sent en plus d'un endroit l'influence », et de citer l'exemple du calcul de résistance pour les gros conducteurs. Guillaume donne ensuite le plan de l'ouvrage, et conclut en évoquant la présence récurrente de données pratiques, et en le qualifiant de « monument de haute science ». ³⁰

Un autre ouvrage mêlant bases théoriques et applications est dû à Bernard Brunhes. Ancien élève de l'École Normale et préparateur à la Sorbonne, Brunhes — qui a notamment rédigé le second volume du livre *Électricité et Optique* de Poincaré — donne des conférences d'électricité aux officiers de Marine à l'Observatoire de Montsouris en 1892-93, puis devient professeur à l'Institut industriel du Nord (Lille) où il enseigne à des élèves de génie civil. C'est dans cet esprit qu'il publie un *Cours élémentaire d'Électricité* (1895). Dans la revue qu'il en fait, Marcel Brillouin met en avant le choix de Brunhes de faire un exposé qui donne clairement les bases théoriques de l'électricité et les notions principales au début du livre, et enchaîne sur les applications industrielles. Brillouin souligne la réussite de la démarche : « On peut voir, d'après cette rapide analyse, que ce livre est bien fait pour les lecteurs auxquels il est destiné. Il est nourri d'exemples numériques choisis et complets, et, comme tel, il pourra être plus utilement étudié que maint recueil de problèmes d'électricité ». Point important, il souligne également la faculté de la nouvelle génération d'enseignants, emmenée notamment par Paul Janet, et formée au rythme des progrès de l'électricité, à aborder les différents aspects de la question de l'électricité : ³¹

De telles publications, dont plusieurs jeunes professeurs de nos facultés de province ont donné l'exemple depuis quelques années, montrent bien qu'une forte culture mathématique ne détruit pas nécessairement le sens de la logique expérimentale, et que ce sont ceux qui connaissent le mieux le fond des choses qui sont les plus capables d'adapter le plan d'exposition à l'auditoire, et d'enseigner la même science le mardi à l'Institut industriel tout autrement et dans un tout autre esprit qu'ils n'ont fait le lundi à la Faculté.

Parmi les autres cours ou traités, certains sont écrits par des ingénieurs, et spécifiquement pour des ingénieurs. C'est le cas d'un ouvrage de Félix Lucas, ingénieur des Ponts et Chaussées et candidat malheureux à la chaire d'Électricité du CNAM (voir 8.2 p.242). En 1892, Lucas

30. Guillaume 1897. Sur les *Leçons* de Mascart et Joubert voir Atten 1992, p. 141-53.

31. Brillouin 1895.

publie un *Traité d'électricité à l'usage des ingénieurs et des constructeurs*. Dans la revue qu'en fait Guillaume, celui-ci souligne la clarté de l'ouvrage, par l'utilisation des schémas et description de machines électriques. Il conclut : « son ouvrage sera éminemment utile pour les hommes techniques auxquels il s'adresse ». ³²

Les revues de ces différentes sources bibliographiques donnent une idée particulièrement claire du type d'ouvrage auquel le lecteur risque de se confronter. Un lecteur de très bon niveau scientifique pourra ainsi se tourner vers le livre de Duhem, alors que des ingénieurs seront probablement attirés par une approche pratique des phénomènes.

9.2 Les revues électriciennes

Une multiplication des revues spécifiques

Le développement de l'électricité au niveau industriel s'accompagne de la naissance de nombreux journaux ou revues spécialisés dans ce domaine. Le premier d'entre eux est porté par le comte Théodore du Moncel, qui publie en 1876 le journal *L'électricité, revue scientifique illustrée*, au moment du projet d'exposition de 1876. Mais comme l'exposition en question, le journal ne connaît pas une franche réussite (même s'il restera publié jusqu'en 1894). Il est vite supplanté par une nouvelle revue, *La Lumière Électrique : Journal universel d'électricité* dont le premier numéro paraît en avril 1879. Cette émergence s'accompagne d'un succès grandissant, puisque le nouveau journal augmente sa fréquence peu à peu. Dans son article sur les revues électriques à la fin du XIXe siècle, ³³ Yves Bouvier signale que le journal adopte « dès octobre 1879, une périodicité plus intense en paraissant deux fois par mois. Puis, en 1880, la revue devient hebdomadaire, rythme conservé par la suite sauf entre le 1^{er} juillet et le 31 décembre 1881, période qui voit la sortie d'un numéro deux fois par semaine (le mercredi et le samedi) », pendant la tenue de l'exposition (voir 5.2).

Cette augmentation de la périodicité à la fin de l'année 1881 n'est évidemment pas due au hasard, puisqu'elle survient au moment de l'Exposition Internationale d'Électricité. Le journal, qui appartient à Cornélius Herz, l'un des grands promoteurs de l'Exposition, est l'organe de diffusion officiel. Mais cela ne l'empêche pas d'avoir de la concurrence. Un second journal est créé en avril 1881, publié sous le nom de *L'Électricien : revue générale d'électricité*.

32. Guillaume 1892 (b).

33. Bouvier 2008. Bouvier précise que le journal *L'électricité* est suspendu au bout de six numéros et à nouveau publié à partir de 1878.

Partant, les nouvelles revues fleurissent allègrement. En regardant l'annuaire de la presse française en 1886, on peut lister : « le *Journal du gaz et de l'électricité* (1880), le *Journal des applications électriques et électrochimiques* (1884), la *Revue internationale de l'électricité et de ses applications* (1885), *L'Étincelle électrique* (1886), ... ». ³⁴

Cette première vague de revues, créées dans la lignée de l'Exposition de 1881, restent centrées sur les progrès liés à la recherche ou au développement d'applications de laboratoire et multiplient « les comptes rendus des débats de l'Académie des sciences et des congrès de la société française de physique ». D'après Bouvier, elles se voient « progressivement marginalisées au profit de titres focalisés sur les applications industrielles de l'électricité ». ³⁵ D'autres journaux voient le jour, qui mettent « l'accent sur les enjeux industriels : *L'industrie électrique* (1892), le *Journal de l'électricité* (1893), *La semaine électrique* (1893), la *Revue pratique d'électricité* (1894), *L'énergie électrique* (1894) ou encore *L'électrochimie* (1895) ». ³⁶

Pour se former sur l'évolution des théories électromagnétiques, ces nouveaux journaux, tournés vers l'industrie et les applications, seront probablement peu adaptés. À l'inverse, les revues que l'on pourrait qualifier de « plus anciennes », datant du début des années 1880, semblent offrir plus de possibilités. Faisons pour le moment exception du journal *La Lumière Électrique*, qui possède, à notre sens, une ligne éditoriale bien particulière et que nous détaillerons dans le chapitre suivant, et focalisons-nous ici sur l'autre grande revue de l'époque, *L'Électricien*.

Mais avant de détailler ce journal, mentionnons un autre cas particulier. À ces revues spécifiquement dédiées à l'électricité, nous pouvons ajouter un autre journal tourné vers l'industrie. ³⁷ Le journal *La Nature* créé en 1873, est légèrement plus ancien. Son sous-titre *Revue des sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie* montre l'orientation souhaitée vers les applications. Le lectorat visé est clair : le journal s'adresse plutôt à un large public, et non « au monde savant » que Gaston Tissandier, le fondateur du journal, évoque dans sa préface. ³⁸ Il s'agit d'un journal généraliste, qui offre toutefois rapidement une part importante à l'électricité dans ses publications. Le secrétaire de rédaction est le vulgarisateur Henri de Parville, qui couvrira largement l'Exposition de 1881 pour le grand

34. Mermet 1886. Dans la liste qu'il propose, Bouvier commet quelques imprécisions (Bouvier 2008, p. 77), même s'il souligne que certaines d'entre elles n'eurent qu'une existence éphémère.

35. Bouvier 2008, p. 77.

36. Bouvier 2008, p. 77-8.

37. Il existe d'autres journaux portant sur des thèmes industriels, comme le *Génie civil*, créé en 1880, mais qui n'abordent jamais les questions en lien avec l'électromagnétisme.

38. *La Nature* 1873.

public (voir 5.2). Le principal auteur pour les articles traitant de l'électricité est le jeune ingénieur Édouard Hospitalier, futur professeur à l'EMPCI (voir 8.1), qui publie à partir de 1880 entre quatre et neuf articles par semestre.

Contrairement au domaine de l'électricité pratique, le journal n'accorde aucune place à la théorie électromagnétique. Entre sa création et la fin du siècle, aucun article ne parle de la théorie de Maxwell. Les expériences de Hertz sont évoquées dans une courte note de 1889, qui résume le principe de ces expériences, et dans la nécrologie du savant allemand.³⁹ Les dernières théories électromagnétiques de Lorentz ou Larmor ne sont pas traitées.

L'Électricien : Revue Générale d'Électricité

L'Électricien est un journal qui paraît de 1881 à 1910, bimensuel puis hebdomadaire à partir de 1885. Dans le comité de rédaction, on retrouve Ernest Mercadier, ingénieur des Télégraphes et tout récemment nommé directeur des études de l'École Polytechnique, Charles-Marie Gariel, professeur de physique à l'École des Ponts et Chaussées ou encore Gaston Tissandier, fondateur du journal *La Nature*. Le secrétaire de rédaction est Édouard Hospitalier. Autant de personnages que nous avons déjà rencontrés dans l'étude des écoles d'ingénieurs ou des journaux généralistes.

Dans l'avis au lecteur qui débute le premier numéro, les ambitions de la revue sont « d'exposer tous les faits qui se succèdent dans le domaine de l'électricité, et d'en retracer l'histoire complète ». Par rapport aux sources publiées dans le journal, on retrouve principalement la diffusion des travaux de recherche exécutés en France ou à l'étranger. Si l'avis ne mentionne pas explicitement de sociétés scientifiques comme l'Académie des sciences, le journal se veut « tout à la fois l'organe de la science pure et de la science appliquée ».⁴⁰

Le nombre de publications portant sur l'électromagnétisme reste pourtant très restreint. Dès 1881, on constate un choix de ligne éditoriale très orientée vers la technique, avec des articles décrivant certains instruments et dispositifs électriques. Aucun article ne traite des théories électromagnétiques. Le premier article qui mentionne la théorie électromagnétique de la lumière est publié en 1897, il s'agit d'un court article de deux pages sur « L'énergie et la théorie électromagnétique de la lumière » d'Albert Nodon.⁴¹ Dans cet article, l'auteur donne les idées de Maxwell sur l'identité des perturbations électriques et lumineuses circulant

39. *La Nature* 1889 et *La Nature* 1894.

40. *L'Électricien* 1881.

41. Nodon 1898. Nodon fut notamment l'un des membres fondateurs de la Société astronomique de Bordeaux (Source : Puyau 1934).

à travers l'éther. Il souligne également que l'éther a depuis été contesté :⁴²

Nous admettons bien en effet l'existence de cet intermédiaire hypothétique et assez vaguement défini qui existe entre l'énergie et la matière, et qu'on appelle l'*éter*, mais cette pure supposition, qui n'a pas encore reçu la confirmation de l'expérience, ne doit pas encore figurer dans l'expression des faits physiques, et elle ne doit rester, jusqu'à nouvel ordre, qu'une simple entité mathématique.

Cette vision de Nodon est assez intéressante, puisque dans la fin de son article il reformule une des hypothèses de Maxwell en disant que « les vibrations électriques se propagent en ligne droite à travers l'*espace* de la même façon que les vibrations lumineuses », ⁴³ et non à travers l'*éter*. Précisons toutefois que l'auteur ne donne aucune référence précise à une théorie, et qu'il ne fait que signaler que l'éther n'a « pas encore » reçu de confirmation expérimentale. Il semble difficile d'y voir une formulation de la théorie de Lorentz et d'un éther qui ne serait qu'un référentiel. Un lecteur non averti qui consulterait cet article aurait une idée basique du rôle de l'éther, comme véhicule non (encore) prouvé des vibrations électriques.

Mis à part cet article, les informations concernant les points théoriques sont toujours transmises au travers des rapports des sociétés savantes, notamment l'Académie des sciences. On retrouve par exemple une note d'Henri Pellat sur le rapport des unités électromagnétique et électrostatique (voir plus loin page 292), publiée en 1891. Mais ces notes sont moins détaillées que ne peuvent l'être, par exemple, celles de la *Revue générale des sciences*, et ne donnent pas une description des théories auxquelles les travaux se rapportent. Il en est de même pour les bibliographies, très complètes dans la *Revue* précédemment mentionnée. Dans *L'Électricien*, l'auteur de la bibliographie ne rentre pas dans le détail des concepts. Ainsi, la bibliographie du *Traité Élémentaire d'électricité*, traduit de Maxwell et publié en 1884 (voir 8.2 p. 233) ne donne aucune information sur les idées de Maxwell. Néanmoins la bibliographie signale bien que la notice de l'éditeur W. Garnett (dans laquelle il rappelle ces idées) est essentielle à la compréhension de l'ouvrage.⁴⁴

Le premier trait qui ressort du bilan des journaux spécifiques à l'électricité, ou à l'industrie en général comme *La Nature* est l'absence presque totale d'articles originaux s'intéressant aux points théoriques. Ceux-ci sont abordés dans le cadre de notes et comptes rendus de sociétés savantes, qui relatent souvent la réalisation d'expériences, mais ne rentrent pas dans le détail des idées auxquelles ces expériences se réfèrent. Il est clairement impossible pour un ingénieur

42. Nodon 1898, p. 54. Les italiques sont de Nodon.

43. *Ibid.*, l'accentuation est nôtre.

44. *L'Électricien* 1884.

lisant ces revues de se maintenir au courant de l'évolution des théories électromagnétiques.

Mais dans ces conditions une question demeure : un ingénieur consultant régulièrement *L'Électricien* peut-il donner une définition de l'électricité ? Sa réponse serait probablement déroutante : l'électricité n'existe pas. Cette réponse ne serait d'ailleurs pas la sienne, mais celle qu'il aurait trouvé dans un article particulier du journal. En octobre 1888, le principal contributeur au journal, Édouard Hospitalier, écrit un article intitulé « Qu'est-ce que l'électricité ». ⁴⁵ Il reprend, et discute, le discours d'ouverture de William Henri Preece, président de la section G lors du colloque de la British Association. Avant de revenir sur le contexte de ce discours, résumons rapidement son contenu (voir Annexe n°10, l'article est repris en intégralité).

Pour répondre à la question sur la nature de l'électricité, Preece oppose les conceptions de l'« électricité » qu'ont les ingénieurs et les physiciens. Il justifie cette opposition en arguant que ce terme désigne deux entités très différentes pour ces deux catégories. Pour les physiciens, l'électricité serait une forme de la matière, similaire à l'éther, entité à laquelle Preece accorde une valeur purement théorique et spéculative. Pour les ingénieurs, au contraire, l'électricité serait une forme de l'énergie, dont la définition est de pouvoir produire du travail. Selon l'orateur, l'électricité des ingénieurs peut se produire, se transporter, se vendre et s'utiliser. La dichotomie que Preece met en avant est claire : les physiciens ont de l'électricité une conception théorique, confinant à la métaphysique ; conception dont les ingénieurs n'ont, en pratique, nul besoin, eux qui ont avant tout une approche pragmatique et positiviste. ⁴⁶

Dans la fin de son article, Hospitalier discute rapidement ce point de vue. Il contredit Preece en réfutant une séparation aussi nette entre la conception des physiciens et celle des ingénieurs. Pour lui, la « matière imaginaire » dont parle Preece pour désigner l'électricité des physiciens n'a, de façon certaine, aucune « existence réelle ou subjective » ; on ne connaît que les manifestations de l'électricité : ⁴⁷

Il est donc parfaitement oiseux, dans l'état actuel de nos connaissances, de chercher à définir quelque chose qui ne comporte pas de définition, parce que ce quelque chose

45. Hospitalier 1888.

46. Cette idée de Preece n'est pas nouvelle : dans l'introduction qu'il rédige en 1879 pour un livre d'électricité à destination des étudiants, il dit : « La nature de l'électricité comme une forme de matière ou d'énergie n'est pas encore déterminée, bien que la plupart des électriciens la regarde simplement comme une forme de l'énergie ». Voir : Noad 1879.

47. Hospitalier 1888, p. 580.

n'a pas d'existence. On peut définir l'*énergie électrique*, la *force électromotrice*, l'*intensité d'un courant électrique*, la *puissance électrique* et la *quantité d'électricité* en appliquant les relations fondamentales qui relient ces différentes quantités physiques entre elles : l'électricité n'ayant pas d'existence, ne comporte aucune définition. Telle est la seule réponse que l'on puisse faire à la question : Qu'est-ce que l'électricité ?

À une question paraissant simple, la réponse proposée par Hospitalier serait donc au moins aussi simple : l'électricité n'existe pas. Mais les idées mises en avant dans ce discours sont beaucoup plus profondes. Pour comprendre ce que Preece veut dire, insistons sur le contexte : ce discours n'est pas dû au hasard. William Henry Preece est un ingénieur électricien britannique, ayant travaillé à la Poste britannique (*Post Office*) sur la télégraphie. Ce discours est celui qu'il prononce à l'ouverture de la section G (section de Mécanique — au sens industriel) au colloque de la *British Association* à Bath en 1888 (voir 4.1 p. 104).⁴⁸

Quelques mois plus tôt, Hertz a publié les résultats de ses expériences sur les ondes électromagnétiques ; alors que Preece préside la section G de Mécanique, Francis FitzGerald, président de la section A de Sciences physiques et mathématiques, profite de la tribune qui lui est offerte pour clamer le triomphe de la théorie de Maxwell. Pour Preece, il s'agit avant tout de marquer l'indépendance du domaine des ingénieurs avec celui de la théorie, surtout pour celle de Maxwell dans laquelle l'« électricité » est un concept particulièrement difficile à appréhender (voir 11.2 p. 344). Pour les ingénieurs, nous dit Preece, l'électricité est avant tout une forme d'énergie, que l'on peut produire, transporter, utiliser ou acheter. Si les physiciens souhaitent désigner un concept particulier, une « matière imaginaire pour satisfaire aux hypothèses et aux abstractions mathématiques », ils peuvent la désigner « coulombisme » ou « électron ». En attaquant de façon si véhémement les physiciens, Preece veut avant tout préserver la vision des ingénieurs.

Le contexte de cette prise de position radicale semble échapper à Hospitalier qui, dans son article, s'oppose à une différence aussi marquée entre physiciens et ingénieurs. Ce faisant, il interprète mal le discours de Preece, et dans l'article qu'il propose, il tranche nettement sur l'existence de l'électricité. Il est difficile de dire si Hospitalier fait ici preuve de second degré, pour à son tour critiquer le discours de Preece, mais cela semble peu probable. L'idée qu'Hospitalier a de l'électricité n'est pas forcément celle qui ressort de la conclusion, mais

48. William Henry Preece (1834-1913) a notamment étudié à Londres sous la direction de Faraday et s'est ensuite tourné vers l'ingénierie et la télégraphie. Il a occupé les fonctions de vice-président au sein de la Société des ingénieurs du Télégraphe britannique. Pour ses contributions voir : vers Pocock 1988.

son jugement est peut-être trop net pour un lecteur non averti, qui ne retiendrait de l'article que cette conclusion.

Dans la principale revue dédiée à l'électricité, *L'Électricien*, on retrouve très peu d'informations sur les points théoriques comme l'éther ou l'étude des phénomènes électromagnétiques en général. Dans les différents articles publiés, l'électricité n'est en général pas définie. Lorsqu'elle l'est, comme dans l'article de Hospitalier, cette définition manque de recul. Le canal entre les journaux de physique et les journaux d'électricité demeure large, et laisse la place à d'autres types de publications.

9.3 La diffusion de la SIE

Le Bulletin de la SIE

La Société Internationale des Électriciens, créée en 1883 à la suite de l'Exposition Internationale d'Électricité de 1881, se dote assez rapidement d'un *Bulletin* mensuel, lui servant d'organe de diffusion. Le premier numéro est publié en janvier 1884. Dans l'introduction, les principales raisons du succès de cette entreprise semblent autant de raisons à la création de ce nouveau *Bulletin* :⁴⁹

La naissance de la Société internationale des Électriciens a eu lieu dans des conditions qui semblent devoir assurer à cette dernière une prospérité durable et utile. Cette Société s'est formée presque spontanément ; à peine quelques hommes d'initiative avaient-ils ébauché, en principe, le Programme de son institution, que les adhérents affluaient de France et de l'étranger : tous sollicitaient le titre de membre fondateur.

L'Exposition et le Congrès de 1881 ont été la révélation décisive de la puissance électrique. Ces solennités internationales ont démontré combien il importe de réaliser l'union de toutes les capacités pour atteindre les buts nouveaux et multiples que l'Électricité offre à l'avancement scientifique, au perfectionnement industriel et au progrès économique.

Parmi les membres du comité d'organisation, on retrouve plusieurs noms récurrents de la physique et de la théorie électrique : Jules Violle, Gustave Séligmann-Lui, ou encore Alfred Potier, alors président de la SFP. Parmi les membres fondateurs étrangers, Rudolph Clausius

49. *Bul. SIE* 1884.

et Gustav Kirchhoff représentent l'Allemagne, Hermann von Helmholtz est nommé président d'honneur, de même que William Thomson. Sans surprise, nous retrouvons la grande majorité des scientifiques présents au Congrès de 1881.

Cette part de physiciens dans le comité de la SIE se retrouve beaucoup moins dans les articles publiés. Outre les comptes rendus des séances mensuelles de la Société, ainsi que la liste des membres régulièrement en augmentation (1000 adhérents lors de la création, le nombre mensuel de demandes d'admissions dépasse encore la centaine deux ans plus tard),⁵⁰ on retrouve dans le *Bulletin* des articles portant principalement sur des dispositifs électriques. Les articles qui abordent les points théoriques en sont quasiment absents : un seul article traite en détail de la théorie de Maxwell, article particulièrement intéressant que nous allons discuter. De la même façon, nous détaillerons un article de Jules Joubert sur les expériences de Hertz, ainsi que le mémoire de Hertz, qui sont parmi les seules publications à traiter de ces expériences.

En 1886, Gustave Séligmann-Lui, à qui l'on doit la traduction l'année précédente du *Traité* de Maxwell, publie un article sur « la théorie de l'électricité de Maxwell ».⁵¹ C'est de cet article que Louis Chappuis, professeur de physique à Centrale, tire en (très) grande partie le contenu de son cours sur les idées de Maxwell (qu'il inclut dans la partie abordant les phénomènes électro-optiques, voir 8.2). Nous pourrions garder à l'esprit que cet article apparaît donc également dans le cours de Centrale.

Après un bref rappel de l'origine des actions à distance en électricité, utilisées par analogie avec la loi de la gravitation universelle, Séligmann-Lui évoque Faraday et les lignes de force. Il souligne que ces lignes ne sont pourtant « que des abstractions, des entités géométriques, incapables de déterminer aucun mouvement ».⁵² Point important, pour introduire la théorie de Maxwell l'auteur commence par mentionner la théorie ondulatoire de la lumière et l'existence d'un milieu subtil dans lequel l'énergie se déplace sous deux formes, potentielle et cinétique. Si Séligmann-Lui ne mentionne pas explicitement l'éther, la description qu'il en donne ne laisse guère de doute à un lecteur français. Il rappelle également le principe de mécanique pour les corps en rotation, qui exercent une pression supplémentaire sur les bords et une tension attractive selon l'axe. Il énonce ainsi l'hypothèse principale de Maxwell (les citations que nous donnons sont reprises mot pour mot, ou modifiées de façon très légère,

50. *Bul. SIE* 1885.

51. Séligmann-Lui 1886.

52. *Ibid.*, p 323.

par Chappuis dans son cours) :⁵³

Tout milieu susceptible de transmettre la force magnétique est constitué par une infinité de corpuscules sphériques ou cellules (*cells*) susceptibles de tourner. Sous l'influence de la force magnétique, ces corpuscules prennent, autour des lignes de force comme axe, un mouvement de rotation, dont le sens et la vitesse dépendent du sens et de l'intensité de la force.

L'auteur explique ensuite les actions magnétiques en utilisant cette hypothèse des tourbillons, montrant que selon la ligne qui joint les pôles opposés de deux aimants distincts la tension selon la ligne de force (donc selon l'axe des tourbillons) augmente. À l'inverse, deux pôles de même signe subissent une répulsion, due au fait que les tourbillons s'orientent dans des sens opposés.

Pour expliquer le courant électrique, Séligmann-Lui présente l'autre hypothèse de Maxwell sur les *idle wheels*, qu'il appelle dans toute la suite « particules » (voir 2.2) :⁵⁴

Maxwell suppose qu'il existe des particules sphériques extrêmement petites placées entre les cellules qui, roulant sans glisser sur leurs surfaces, opèrent la transmission d'un tourbillon moléculaire à l'autre sans inversion comme fait un pignon de renvoi entre deux roues dentées. Ces particules constituent l'électricité [...].

Séligmann-Lui ne développe pas explicitement les idées de Maxwell portant sur les courants de déplacement. Pour expliquer la transmission d'une perturbation, il explique, de façon presque intuitive, l'origine de la propagation de proche en proche en décrivant la série d'actions tangentiels des particules sphériques sur les cellules. Le courant électrique, qui est un mouvement d'une couche de particules, met en rotation les premières cellules contiguës, et ainsi de suite. Le mécanisme se propage en dehors du conducteur, au sein du diélectrique environnant. Le phénomène de propagation provient du caractère élastique des cellules :⁵⁵

Si les cellules ont une élasticité propre et par suite, ne commencent à obéir à l'impulsion tangentielle qu'après avoir subi une certaine déformation, le mouvement ou l'induction électromagnétique ne se transmet pas d'une façon instantanée, mais au contraire avec une vitesse définie dépendant des qualités élastiques des milieux, c'est-à-dire de la densité et de l'élasticité des cellules des diélectriques.

53. *Ibid.*, p. 324. Les italiques sont de Séligmann-Lui.

54. *Ibid.*, p. 325-6.

55. *Ibid.*, p. 326-7.

Par la suite l'auteur utilise ces notions pour décrire les principaux phénomènes d'électrodynamique, utilisant des schémas relativement explicites. En premier lieu il justifie la relation entre le sens du courant et le sens de la force magnétique : la force de champ magnétique créée est dans le sens direct par rapport au sens du courant, puis les actions entre courants et champ magnétique, que Séligmann-Lui regroupe sous le nom de « lois d'Ampère ».

Sur la figure 9.1,⁵⁶ un champ magnétique extérieur est figuré par la ligne (SN), champ dans lequel on vient placer un courant électrique circulant dans la direction donnée par C . Le cercle A représente l'action (tourbillon) du champ magnétique, les cercles B et B' les tourbillons dus au courant électrique (cercles orientés selon la direction n). Au-dessus du fil, l'action est dans le même sens que celle du champ extérieur, et elle lui est opposée en-dessous du fil. L'auteur en déduit que la vitesse angulaire est moindre en-dessous qu'au dessus, et que le fil subit une force vers le bas.

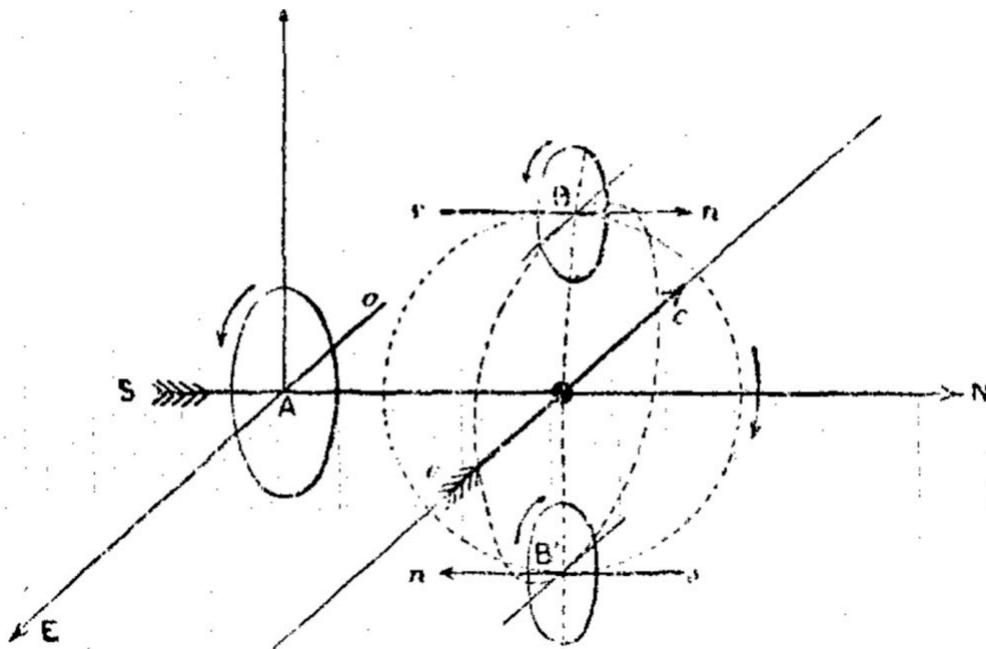


FIGURE 9.1 – Figure représentant le sens de la force magnétique par rapport au sens du courant. (Tiré de Séligmann-Lui, op.cit. p 327).

De la même façon, la figure 9.2 montre l'action mutuelle de deux courants. Si les courants sont de même sens (flèches c et c') les actions dans l'espace médian sont opposées, d'où une

⁵⁶. Pour des raisons de netteté, les images des figures sont tirées du cours de Chappuis (Chappuis 1891). Elles sont identiques à celles de l'article de Séligmann-Lui, que nous donnons en référence.

répulsion. Séligmann-Lui aborde ensuite le cas des courants induits, en reprenant l'explication mécaniste qu'il donnait initialement. Le mouvement de rotation des cellules, initié par un premier courant électrique, se propage dans un diélectrique et atteint un second conducteur. Au sein de celui-ci, les particules sont libres de se mouvoir, ce qui crée un courant. Les principes de mécanique ont pour conséquence que ce courant est de sens opposé au courant primaire. L'auteur précise que ce courant secondaire ne peut être que transitoire, car les actions tangentielles sur les cellules s'équilibrent ensuite.

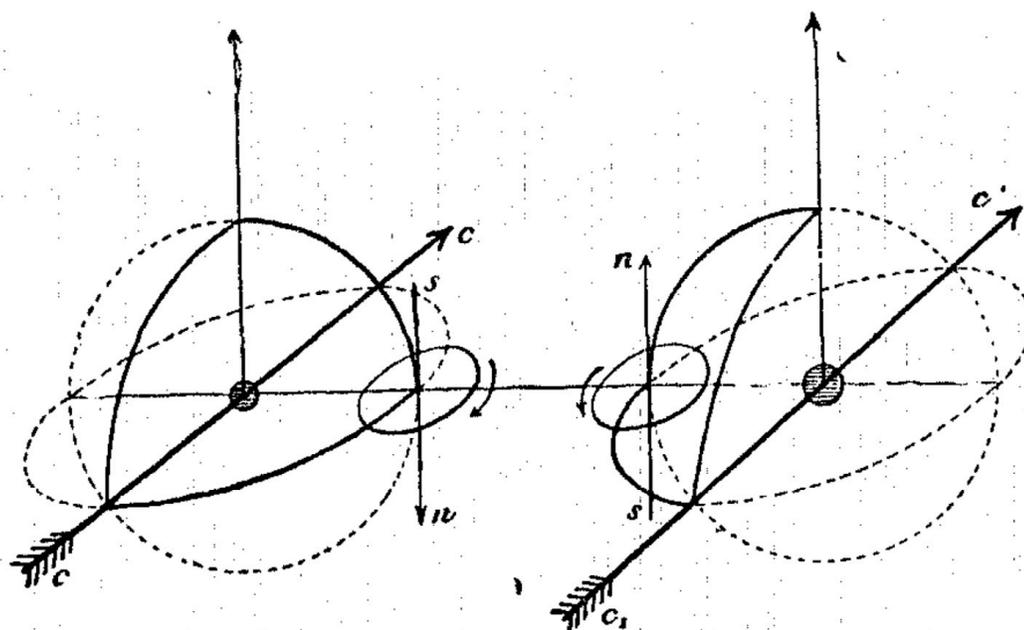


FIGURE 9.2 – Figure représentant les lignes de force créées par deux courants de même sens. (Tiré de Séligmann-Lui, op.cit. p 328).

Dans le cas d'un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique, la loi de Lenz peut également être retrouvée en utilisant l'hypothèse des tourbillons.⁵⁷ Sur la figure 9.3, un conducteur se déplace selon une direction orthogonale aux lignes de force (perpendiculaires au plan de la feuille). Lorsque ce conducteur se déplace, nous dit Séligmann-Lui, il comprime les tourbillons placés devant lui, ce qui augmente de fait leur vitesse de rotation. À l'inverse, les tourbillons derrière lui se dilatent et voient leur vitesse diminuer. Il s'ensuit sur les particules situées dans le conducteur une résultante d'actions tangentielles, créant ainsi un courant (indiqué par la flèche « sens du courant »). Le fil devient un conducteur parcouru par un

⁵⁷. La loi de Lenz est une loi phénoménologique posant que les courants d'induction créés ont des effets qui s'opposent aux causes de l'induction.

courant et circulant dans un champ magnétique ; il est donc soumis à une force, et cette force tend à s'opposer au mouvement initial du conducteur.

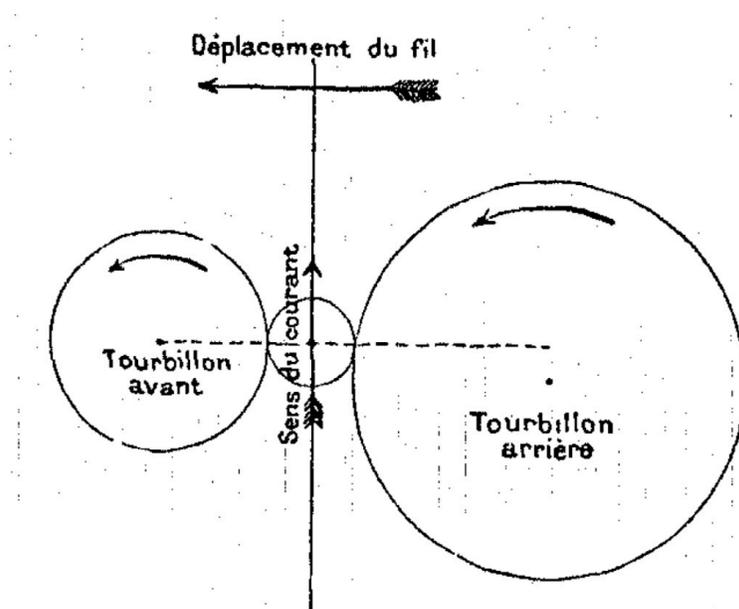


FIGURE 9.3 – Figure représentant le déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique (Tiré de Séligmann-Lui, op.cit. p 330).

Séligmann-Lui décrit également les phénomènes d'électrostatique. Les particules d'électricité dans un diélectrique, soumises à une force électromotrice sur une large portion, ne peuvent se déplacer loin de leur position d'équilibre. Les cellules sont alors soumises à des contraintes tangentielles égales de part et d'autre, ce qui n'entraîne pas de rotation mais une déformation élastique. Lorsque la force extérieure cesse, les cellules reprennent leur forme initiale et exercent une force sur les particules, rendant lors de la décharge ce qui a été accumulé lors de la charge. Séligmann-Lui parle de déplacement électrique, en précisant que, contrairement au courant, les particules ne peuvent pas s'éloigner de leur position d'équilibre.

Dans le paragraphe suivant, l'auteur justifie l'égalité du rapport des unités électromagnétique et électrostatique et de la vitesse de la lumière. En reprenant la définition des unités de charge électrostatique et de charge électromagnétique, il montre que la vitesse de propagation d'une perturbation se retrouve par le rapport des unités, et correspond à la racine carrée du rapport de la densité sur l'élasticité du milieu. Il termine son article par trois paragraphes portant sur les liens entre électricité et optique. Le premier paragraphe aborde l'égalité de la

permissivité diélectrique (ou pouvoir inducteur) et du carré de l'indice de réfraction du milieu. Le second traite du cas des substances conductrices et de leur opacité. Le dernier porte sur la rotation magnétique et justifie rapidement le résultat de l'expérience magnéto-optique de Faraday.

Séligmann-Lui conclut son article en donnant un avis critique sur les hypothèses de Maxwell qu'il a détaillées au cours de cet article. Il nous dit :⁵⁸

Mais qu'il nous soit permis d'insister sur un point encore, et non le moins essentiel. Quelque idée que l'on se fasse des relations des conducteurs et des milieux diélectriques, quelque valeur que l'on accorde à l'hypothèse si originale de Maxwell, ces conceptions intangibles de l'esprit, ces êtres d'imagination, particules, cellules, tourbillons, n'interviennent que comme mécanisme de liaison, et n'ont pas à figurer dans les équations finales. Les résultats que l'on a obtenu à leur aide sont et restent indépendants de leur existence effective, et demeurent définitivement acquis. Tout l'échafaudage de nos spéculations peut n'être que mensonge : du moins nous a-t-il permis d'atteindre et de saisir la vérité.

Cet article est un modèle de clarté dans l'exposé qu'il fait des idées de Maxwell. L'auteur met parfaitement en avant les hypothèses principales et les raisonnements permettant de retrouver les principaux phénomènes électriques connus. Sa place dans le *Bulletin de la SIE* est entièrement justifiée, dans la mesure où il donne à un lecteur sans aptitudes mathématiques particulières une idée des travaux de Maxwell. Nuançons légèrement ce jugement flatteur, en regrettant que Séligmann-Lui ne précise pas d'où viennent les hypothèses qu'il décrit dans son article, hypothèses que Maxwell présente dès son mémoire de 1861-62 (voir 2.2).

Séligmann-Lui est parfaitement conscient de l'absence de ces notions dans le *Traité* de Maxwell, puisqu'il en est lui-même le traducteur. Il apparaît donc que l'auteur fait un choix clair dans ce qu'il souhaite présenter de la théorie de Maxwell, en exposant avant tout les hypothèses mécanistes, plus « sensibles », que les travaux dynamiques mathématiques. Pour quelles raisons l'auteur fait-il ce choix ? Celle-ci nous semble nette : cet article est destiné à un public bien ciblé, en l'occurrence le lectorat du bulletin d'une société d'ingénieurs électriciens. Séligmann-Lui vient de traduire le *Traité* de Maxwell, et il est, à l'époque, l'un des scientifiques français les mieux informés des travaux du Britannique (avec Potier et Cornu, qui ont rédigé les notes de lecture dans la traduction du *Traité*). Il souhaite peut-être diffuser les idées de Maxwell, par un autre moyen que son ouvrage traduit. Il dispose pour cela d'un

58. *Ibid.*, p. 326-7.

canal nouvellement créé : le *Bulletin de la SIE*, mais qui s'adresse avant tout à un lectorat d'ingénieurs et non de physiciens rodés aux méthodes lagrangiennes.

Or les premières idées de Maxwell sur un modèle mécanique de la propagation des perturbations électromagnétiques sont aisément compréhensibles — l'utilité pédagogique d'un modèle est d'ailleurs un argument bien compris par les maxwelliens. Enfin, Séligmann-Lui prend soin de préciser que ces hypothèses sont des étapes intermédiaires, précision que Maxwell apportait déjà et que Chappuis n'apporte pas dans son cours. Permettons-nous ici une comparaison entre cet article de Séligmann-Lui et l'article d'Hospitalier dans le journal *L'Électricien* : ce dernier donnait une idée trop directe en niant l'existence de l'électricité, vision qui, même si ce n'était pas réellement la sienne, ressortait de l'article. De son côté, Séligmann-Lui détaille les hypothèses et donne « une » idée de l'électricité, mais prend soin de préciser dans sa conclusion qu'elle n'est pas forcément vraie.

Si cet article de Séligmann-Lui est particulièrement bien détaillé, c'est en fait le seul traitant de Maxwell qui paraît avant 1889. Cette année là, quelques articles en lien avec les expériences de Hertz paraissent dans le *Bulletin*. Jules Joubert publie un article portant sur une répétition de l'expérience de Hertz qu'il a faite au Laboratoire Central d'Électricité.⁵⁹ L'un de ses paragraphes résume parfaitement l'enjeu des expériences du scientifique allemand :⁶⁰

Ce qui fait le grand intérêt des expériences de M. Hertz ce sont les renseignements précis qu'elles nous donnent sur l'intervention du milieu extérieur dans les phénomènes électriques. L'idée de l'intervention n'est pas chose nouvelle : après les expériences de Faraday et les théories de Maxwell, il ne restait guère de doutes sur ce point dans l'esprit des physiciens ; mais la preuve expérimentale manquait. Elle nous est donnée par les expériences de M. Hertz. Ces expériences montrent, en particulier, que le milieu qui intervient dans les phénomènes électriques est ce même éther qui est le siège des phénomènes lumineux ; que les perturbations des deux espèces s'y propagent dans les mêmes conditions et avec la même vitesse ; enfin qu'il y a identité de nature entre *certaines* phénomènes électriques et les phénomènes lumineux.

59. Joubert publie la même année un article « Expériences de M. Hertz sur les ondulations électriques » dans le *Journal de Physique* (voir Joubert 1889 (b)). Ce dernier est bien plus détaillé que celui présent dans le *Bulletin de la SIE*.

60. Joubert 1889 (a), p. 319. Les italiques sont de Joubert.

Dans cet extrait, Joubert attribue probablement à Maxwell et à la théorie du milieu intermédiaire une solidité qui n'existait pas forcément lorsqu'il avance qu'il n'y avait « guère de doutes » sur une théorie électromagnétique du milieu avant les expériences de Hertz. Néanmoins il met clairement en avant les conclusions qu'on peut alors en tirer.

Dans le même volume on trouve d'ailleurs l'un des discours de Hertz, prononcé le 20 septembre 1889 lors du 62^e Congrès des naturalistes allemands tenu à Heidelberg. Dans ce discours, entièrement traduit en français,⁶¹ Hertz commence par établir la filiation entre les idées de Faraday, celles de Maxwell, et ses propres expériences. Sur les idées de Faraday, il salue en particulier la capacité à se défaire des préjugés portant sur l'électricité, pour aborder le sujet sous un regard nouveau :⁶²

Faraday lisait qu'il existait des électricités et que l'on ne discutait que sur leurs propriétés, et, cependant, il observait, journallement les effets de ces forces, sans jamais rien voir des électricités elles-mêmes : aussi renversa-t-il la proposition. Les forces électriques et magnétiques devinrent pour lui la seule réalité tangible ; l'électricité, le magnétisme descendirent au rang d'objets dont l'existence est fort contestable [...].

Au sujet de Maxwell, Hertz met en avant la jonction établie entre les domaines de l'optique et de l'électricité par le Britannique :⁶³

Les expériences n'apportèrent d'abord aucune solution, et la théorie en vogue resta en désaccord avec les idées de Faraday. En affirmant que les forces électriques peuvent exister indépendamment des fluides correspondants, il contredisait le système généralement admis à cette époque. De même, l'optique d'alors repoussait l'idée que les ondes lumineuses pussent ne pas être de nature élastique. Il semblait qu'une discussion approfondie de l'une ou l'autre de ces hypothèses ne pourrait être qu'une spéculation stérile. Quelle admiration devons-nous donc à l'homme qui sut coordonner ces deux hypothèses si éloignées en apparence, de façon qu'elles se prêtassent un mutuel appui, et qu'il en sortît un système auquel il était impossible de refuser la vraisemblance ? Cet homme est l'anglais Maxwell.

Concernant ses propres travaux, Hertz fait preuve d'une grande modestie en présentant son

61. Hertz 1889. Également publié dans *L'Astronomie*, vol. IX (1890), pp. 50-57. Les citations sont extraites de ce dernier.

62. *L'Astronomie*, op. cit., p. 51.

63. *Ibid.*, p 51. Écossais, Maxwell n'aurait pas forcément apprécié la métonymie de Hertz.

idée sous le sceau de la simplicité. Pour introduire son raisonnement, il fait l'analogie avec la propagation d'ondes sonores dans une pièce, dans laquelle se trouverait un scientifique muni de diapasons et de résonateurs,⁶⁴ et qui mettrait en évidence non seulement la propagation de l'onde sonore par la durée du trajet, mais également les caractéristiques de l'onde (longueur d'onde et célérité). Si l'analogie entre la propagation des ondes électromagnétiques et les ondes sonores est courante, elle prend ici une dimension particulièrement intéressante, car les expériences de Hertz sont ainsi expliquées — par le premier concerné — de manière extrêmement simple, et particulièrement accessible, même sans connaître la théorie de Maxwell. Hertz conclut sur ce point :⁶⁵

Toutes ces expériences sont fort simples au fond, et pourtant leurs conséquences sont des plus importantes. Elles renversent toute théorie qui admet que les forces électriques traversent instantanément l'espace ; elles marquent le triomphe du système de Maxwell. Il ne reste qu'un pas à faire pour arriver dans le domaine propre de l'optique qui nous est bien connu. Si donc, au moyen des ondes électriques, nous parvenions à produire des phénomènes semblables à ceux de la lumière, toute théorie devient superflue ; l'identité des deux ordres de faits ressortira des expériences elles-mêmes. Dans cette voie encore, le succès est possible.

Il poursuit en décrivant les expériences utilisant ses « rayons électriques », obtenus en plaçant un émetteur au foyer d'un miroir parabolique, ce qui permet d'avoir un faisceau électromagnétique, dont Hertz compare les propriétés avec un rayon lumineux.

L'un des points que Hertz met en avant dans son discours est sans conteste la question du milieu intermédiaire, l'éther. Il conclut d'ailleurs son mémoire en posant cette question du milieu comme un problème allant au delà du cadre purement physique. Lorsqu'il parle des question de la philosophie des sciences, il dit :⁶⁶

La nature de l'électricité est une autre de ces grandes inconnues. Elle se ramène à la question de l'état des forces électriques et magnétiques dans l'espace. Derrière celle-ci se dresse le problème le plus important de tous, celui de la nature et des propriétés de la substance qui remplit l'espace, de l'éther, de sa structure, de ses

64. Les résonateurs sont des globes métalliques percés formant une caisse de résonance permettant d'amplifier un son. On peut notamment citer un type de résonateur dû au mentor de Hertz, le résonateur de Helmholtz.

65. *Ibid.*, p. 54.

66. *Ibid.*, p. 55.

mouvements, de ses limites, s'il en possède. Nous voyons de plus en plus cette question dominer toutes les autres, il semble que la connaissance de l'éther ne doive pas seulement nous révéler l'état de la substance impondérable, mais nous dévoiler l'essence de la matière elle-même et de ses propriétés inhérentes, la pesanteur et l'inertie.

La publication de ce mémoire, très accessible à des lecteurs n'ayant pas de compétences mathématiques particulières, donne un résumé clair et concis des enjeux et des résultats des expériences de Hertz. En particulier, le rôle de l'éther est mis en avant et décrit comme l'élément essentiel de la propagation des ondes électromagnétiques, de la même façon qu'il l'est pour la lumière dans la théorie ondulatoire de la lumière.

Hormis ces deux premiers articles de Séligmann-Lui et Hertz qui expliquent clairement la théorie électromagnétique de Maxwell et le rôle de l'éther, on trouve dans le *Bulletin* peu d'informations sur ces points. La découverte de Hertz ne devient pas un sujet omniprésent dans la revue, et à partir de 1890 seuls quelques articles font écho à la théorie de Maxwell. Un article d'Henri Pellat paraît en 1891, article dans lequel l'auteur explique les mesures du rapport d'unités électromagnétique et électrostatique par des expériences qu'il a faites à Polytechnique. Il donne un tableau des précédentes mesures de ces rapports (voir tableau 9.4), et ajoute : « en outre on sait quel intérêt s'attache à la comparaison de ce rapport avec la vitesse des radiations lumineuses pour la justification de la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell ». ⁶⁷ Dans un article de 1894 intitulé « nouvel exposé sur la théorie des phénomènes électriques et magnétiques », Aimé Vaschy évoque la théorie de Maxwell en disant que le Britannique a utilisé une approche ne faisant pas intervenir la notion de masse électrique. C'est d'ailleurs le seul moment où il mentionne Maxwell dans son article. ⁶⁸

Le reste des articles publiés dans le *Bulletin* traite d'instruments électriques (lampes, machines, ...), mais la répartition entre théorie et technique n'est pas constante. Par exemple les volumes des années 1894 à 1897 contiennent très peu d'articles de théorie. Il est néanmoins difficile d'y voir un lien direct avec le développement du journal *L'Éclairage Électrique*, car on retrouve d'autres articles théoriques dans les volumes suivants. Hormis les articles, le *Bulletin* contient des communications scientifiques, en France ou à l'étranger, ainsi que des brèves sur des installations électriques, et des bibliographies d'ouvrages. Le livre de Poincaré publié en 1899 *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes* (voir 11.2 p. 350) fait par exemple l'objet d'une description assez étoffée. ⁶⁹

67. Pellat 1891. Également dans *Bul. SFP*, 1891, p. 145.

68. Vaschy 1894.

69. *Bul. SIE* 1900.

Année	Expérimentateur	Valeur trouvée (.10 ⁸ cm.s ⁻¹)
1856	Weber et Kohlrausch	310,7
1868	Maxwell	284,2
1869	W. Thomson et W.F. King	280,8
1873	Kichan	289,6
1879	Ayrton et Perry	296,0
1880	Shida	295,5
1883	J.J. Thomson	296,3
1884	Klemencic	301,9
1887	Hinstedt	300,8
1889	W. Thomson	300,4
1889	E.B. Rosa	300,0
1889	Rowland	298,2

FIGURE 9.4 – Tableau récapitulatif des expériences sur la mesure du rapport des unités électromagnétique et électrostatique donné par Henri Pellat dans son article. Pellat trouve lui-même une valeur de 300,9 .10⁸. (Tiré de Pellat, H, op.cit.)

L'exposition à l'Observatoire de Paris

Après le succès de l'Exposition de 1881 ayant entraîné sa création, la SIE décide de renouveler l'expérience, dans un format plus restreint, d'une exposition dédiée à l'électricité. Président de la Société et Commissaire général de l'Exposition en 1881, Georges Berger est un ardent défenseur de ce genre de manifestation. Dès la fin de l'année 1884, il souhaite en organiser une, malgré les difficultés financières auxquelles la Société fait face à ses débuts. Lors de l'assemblée générale de novembre 1884, lorsqu'il fait part de la nécessité d'augmenter les rentrées d'argent et les cotisations, il évoque tout de même l'idée d'une exposition : « Nous n'attendrons pas la pluie d'or que je souhaite pour faire une première manifestation publique. Dans deux mois, nous inaugurerons une Exposition d'Électricité dans les salles de l'Observatoire de Paris, gracieusement mises à la disposition de notre Société par l'honorable amiral Mouchez ». ⁷⁰

Le choix de l'Observatoire n'est pas dû au hasard, et celui-ci a déjà une histoire com-

⁷⁰. Berger 1884. L'amiral Ernest Mouchez (1821-1892) est à l'époque le directeur de l'Observatoire, fonction qu'il occupe depuis 1878.

mune avec l'électricité. Dès son arrivée à l'Observatoire, le contre-amiral Mouchez pousse en faveur de l'utilisation du chronographe pour l'enregistrement de l'heure lors des observations, méthode dont il juge qu'elle « absorbe moins l'esprit de l'observateur » par rapport à l'observation « à l'ouïe », et permet de « multiplier les observations ». ⁷¹ L'Observatoire a également un lien particulier avec les présentations d'instruments électriques. On trouve dans ses archives les traces de ces différents événements. Le 21 février 1879, il est le théâtre de projections à la lumière électrique, de l'exposition de divers types de téléphones, ou du crayon voltaïque de Bellet-d'Arros. ⁷²

Le 5 février 1881, l'Observatoire accueille des conférences d'ingénieurs comme Louis-Émile Bertin, Louis Bréguet ou Gustave Trouvé. Sont mises en place des expériences de projections, d'appareils enregistreurs, de télégraphie militaire, d'appareils de vulgarisation. Le 13 mars 1882, des conférences de Bréguet ou d'Ernest Mercadier sont données, des dispositifs d'éclairage électrique sont installés, des stands du ministère des Postes et Télégraphes ainsi que de la société générale des téléphones sont présents. Pour ces premières expositions, aucun organisateur spécifique n'est mentionné. Une lettre adressée au ministre de la part du « Contre-amiral, directeur de l'Observatoire » (Ernest Mouchez) évoque une organisation locale, ce qui incite à penser que c'est l'Observatoire qui choisit d'organiser ces manifestations. Une exposition de la société de physique s'y déroule également le 16 avril 1884.

L'exposition de 1885, initialement prévue en février, est reportée d'un mois pour éviter les désagréments climatiques. Elle se déroule finalement du 22 au 29 mars, en journée de 12h à 18h et en soirée de 20h à 23h. La soirée d'inauguration se tient le 21 mars. L'exposition est bien sûr présidée par Georges Berger. Parmi les vice-présidents on retrouve Edmond Becquerel, Jules Jamin et Henri Tresca, membres de l'Institut des sciences, Édouard Blavier, directeur de l'École Supérieure de Télégraphie, Maurice Lœwy, sous-directeur de l'Observatoire, et Hippolyte Marié-Davy, directeur de l'Observatoire de Montsouris. Le ministre des Postes et Télégraphes Adolphe Cochery est président d'honneur.

Les exposants sont répartis au niveau du 1^{er} étage (salle de la Grande Galerie) ainsi que sur la terrasse sud. Les appareils présentés sont aussi nombreux que variés : les dispositifs d'éclairage (lampes à incandescence, régulateurs à arc, ...), les générateurs et moteurs

71. Observatoire de Paris 1878, p. 6-7. L'observation à l'ouïe consiste à se caler les battements d'une pendule pour estimer à une fraction de seconde près le passage d'un astre derrière un réticule. Le chronographe permet de tracer sur une bande le repère temporel et le pointage du passage de l'astre. Sur ce point voir : Delporte 1908.

72. Le comte Hallez d'Arros est notamment à l'origine d'une tentative d'exposition dès 1876. Voir 5.2 p. 135. Le crayon voltaïque est une variante de la plume d'Edison, servant à créer des plaques d'impressions au moyen d'une plume dans laquelle circule un courant électrique. Sur ce point voir : Hospitalier 1885.

électriques (machine Gramme, dynamo Siemens), des accessoires pour les dispositifs (huile de graissage, courroies de transmission, charbons pour les lampes électriques), câbles télégraphiques et fils électriques, ainsi que des appareils moins ordinaires (scie à ruban, piano électrique, ...). Une Halle des machines a été installée dans la cour principale, — complétée par une annexe dans le jardin côté sud —, pour abriter les dispositifs les plus volumineux : moteurs, générateurs, transmissions électrique par câbles, et certains exposants d'éclairage. Au total ce sont près de 180 exposants qui viennent présenter leurs produits. La grande coupole Est est éclairée et mise en mouvement, et un phare est disposé sur la terrasse supérieure. Les conférences se déroulent dans la salle de la méridienne (aujourd'hui salle Cassini), qui peut accueillir jusqu'à cinq cents personnes. Sur la durée de l'exposition, onze conférences sont données autour des applications de l'électricité :

- Application de l'électricité aux observations astronomiques, C. Wolf,⁷³ Membre de l'Institut.
- Téléphonie, L. Maicre, Ingénieur électricien.
- De l'induction téléphonique, C. Elsasser, Conseiller intime du Département des Postes et télégraphes en Allemagne.
- Les phares électriques, A. de Meritens, Ingénieur-électricien.
- Accumulation à transformation de l'électricité voltaïque, P. Samuel, Ingénieur-électricien.
- Applications de l'électricité à l'art militaire, Le Roux, Professeur à l'école supérieure de pharmacie.
- Applications de l'électricité à la médecine, Docteur Boudet.
- Appareils de mesures galvanométriques, G. Lippmann, professeur à la faculté des sciences de Paris.
- Applications de l'électricité aux chemins de fer, P. Jousset, ingénieur-électricien, Inspecteur de la compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.
- Le transport électrique en vue des distributions automatiques sous les diverses formes de l'énergie, G. Cabanellas, Ingénieur-électricien.
- Applications de l'électricité à la prévision du temps, H. Marié-Davy, Directeur de l'Observatoire de Montsouris.
- Télégraphie, E. Baudot, Ingénieur des Télégraphes

73. Charles Wolf (1827-1918), astronome à l'observatoire, est également l'auteur d'une *Histoire de l'Observatoire de Paris de sa fondation à 1793* (voir Wolf 1902).

Ces conférences, qui portent principalement sur l'aspect pratique de l'électricité, ne font pas mention des théories qui s'y rapportent. En particulier, elles ne contiennent pas d'information relatives à l'éther ou à l'une des théories auxquelles nous nous sommes intéressés. Soulignons tout de même que ces conférences sont intégralement publiées dans le *Bulletin* dans les mois suivant l'exposition, à raison d'une conférence par numéro.

L'affluence dépasse largement les prévisions, avec six à sept mille visiteurs par jour, soit plus du double de ce qui avait été envisagé. Le succès populaire est tel que l'exposition est finalement rallongée d'une semaine, pour ne fermer ses portes que le vendredi 3 avril au lieu du dimanche 29 mars.⁷⁴ Dans les journaux d'électricité, l'exposition de l'Observatoire est mentionnée sans toutefois être vraiment mise en avant. En particulier, dans le journal *La Lumière Électrique* qui avait très largement couvert l'Exposition de 1881, on parle beaucoup de l'exposition internationale d'électricité, qui se tient cette année-là à Philadelphie, mais quasiment pas de l'exposition à l'Observatoire (voir note). Cette dernière fait simplement l'objet d'un court article dans le numéro du 9 mai (soit plus d'un mois après sa fin), dans lequel un journaliste raconte sa visite à l'exposition. Pour en avoir une véritable couverture médiatique, il faut se tourner vers l'autre journal spécialisé, *L'Électricien*, qui donne dans le numéro du 28 mars 1885 une présentation des exposants de l'exposition, avec un détail de toutes les salles. Le bilan qui en est fait est élogieux : « C'est un succès, un succès qui dépasse les espérances et montre une fois de plus combien le public s'intéresse aux choses de l'Électricité ».⁷⁵

Cette histoire entre l'Observatoire et l'électricité ne s'arrête d'ailleurs pas là, puisque au début de l'année 1890 l'électricité est installée « pour l'éclairage des deux télescopes équatoriaux coudés », éclairage qui va s'étendre à la salle méridienne « où la chaleur des becs de gaz trouble souvent les observations ».⁷⁶ La mobilité par l'électricité arrive peu après : en 1892 la cabane roulante du grand équatorial coudé est mue par un moteur électrique.⁷⁷ L'automatisation de l'enregistrement est à peine plus tardive : en 1906, un système de transmission installé sur le Cercle du jardin permet de faire tourner la vis d'ascension droite du télescope à l'aide d'un moteur électrique, à la vitesse d'observation que l'on souhaite pour une étoile donnée.⁷⁸

74. *Bul. SIE* 1885, p. 104.

75. *L'Électricien* 1885. L'absence de l'exposition dans les pages du journal *La Lumière Électrique* n'est probablement pas due au hasard : Cornélius Herz, propriétaire du journal, est un fervent défenseur de Marcel Deprez, qui a été critiqué par plusieurs membres de la SIE depuis ses échecs répétés lors de démonstrations. Herz a donc probablement certains « désaccords » avec la SIE, organisatrice de l'exposition.

76. Observatoire de Paris 1890.

77. Observatoire de Paris 1893.

78. Observatoire de Paris 1907.

Conclusion

Les nombreuses voies proposées par la presse scientifique à la fin du XIXe siècle pourraient égarer un lecteur cherchant à se former sur certains points particuliers. Concernant les théories électromagnétiques et l'éther, cependant, les possibilités ne sont pas si nombreuses. Les revues de haut niveau, comme le *Journal de Physique*, s'adressent à des physiciens, ou tout du moins des lecteurs parfaitement au courant des bases de ces théories. Il n'y a pas de volonté d'explication, les articles qui y sont publiés constituent presque uniquement des articles de recherche. À l'inverse, les journaux spécifiques dédiés à l'électricité comme *L'Électricien* offrent de nombreuses références sur l'instrumentation et l'appareillage électrique, mais ne proposent que très peu d'articles théoriques.

Pour un lecteur attentif néanmoins, quelques rares articles permettent d'avoir une explication adaptée des théories électromagnétiques. Dans le *Bulletin de la SIE*, ces articles marquent une volonté de s'adapter au lectorat. En dehors des articles originaux, il est possible de trouver plusieurs comptes rendus et notes, plus ou moins complètes. Dans la *Revue générales des sciences*, ces publications résument souvent bien les principaux points d'une théorie, sans entrer dans des détails trop difficiles à appréhender. De plus, les bibliographies d'ouvrages proposées dans cette revue donnent une bonne idée des livres vers lesquels un lecteur peut se tourner pour compléter sa formation selon son domaine de connaissances.

Mais pour « l'électricité », une nouvelle ère a commencé. Pour cette science immense, le XXe siècle sera le siècle de l'éther.
Alexandre Stoletow

Chapitre 10

La Lumière Électrique : du journal technique aux articles de recherche

Le journal *La Lumière Électrique*, créé en 1879, représente à la fin du XIXe siècle une ressource inestimable pour qui veut se former sur l'évolution des théories électromagnétiques. La publication d'articles originaux, dans un véritable but de diffusion de ces idées, marque une nette différence avec les autres journaux spécialisés dans l'électricité. Dans la première partie nous aborderons l'histoire du journal sur les vingt dernières années du XIXe siècle, et sur son changement de nom en 1894, devenant *L'Éclairage Électrique*. Dans la seconde partie, nous analyserons les différentes caractéristiques des articles, et nous montrerons notamment que ce changement n'est pas une rupture mais se fait dans la continuité, sous l'influence d'un groupe de jeunes auteurs autour d'un personnage central, Henri Poincaré. La dernière partie propose une comparaison entre ce journal et un journal anglais, *The Electrician*, dont il partage certaines caractéristiques.

10.1 De la *Lumière* à l'*Éclairage*

À la fin des années 1870, Cornélius Herz occupe une place importante dans le paysage public de l'électricité. Médecin de formation (il a notamment officié comme chirurgien auprès du général Chanzy pendant la guerre de 1870, ce qui lui vaudra la Légion d'Honneur), Herz a la double nationalité française et américaine. Ses parents avaient émigré aux États-Unis en 1848 avec la prise de pouvoir de Louis-Napoléon Bonaparte. Herz revient faire ses études et s'installer en France, mais il garde un œil attentif sur le développement de l'industrie outre-Atlantique. C'est après un voyage aux États-Unis, où il a été « enthousiasmé pour

les nombreuses applications de l'électricité, et impressionné par la personnalité de [Thomas] Edison », que Herz souhaite lancer la constitution d'une première association, le Syndicat Français d'Électricité.¹

Les débuts d'un journal

Homme d'affaire réputé, Herz souhaite étendre ce mouvement favorable à l'électricité. Il est, avec le baron Jacques de Reinach, l'un des grands artisans de l'Exposition d'électricité de 1881. Pour couvrir cet évènement, il lance un journal promis à un bel avenir : *La Lumière Électrique*. La direction scientifique est confiée au comte Théodore du Moncel, l'un des premiers « ingénieurs-électriciens » (voir Annexe n° 6). Le premier secrétaire de rédaction est Franck Géraldy, ancien élève de l'École Polytechnique. Dans l'avis aux lecteurs ouvrant le premier numéro, le comité de rédaction reconnaît les premiers efforts faits vers un développement d'une science électrique rigoureuse. Il annonce :²

Nous avons l'intention d'aller plus loin encore dans cette voie des mesures dynamométriques, électriques, photométriques, nous voulons tout réduire à des évaluations numériques, et nous ne doutons pas du concours que nous trouverons certainement chez les inventeurs, les constructeurs, les personnes techniques, et l'ensemble de ceux que la question intéresse.

Pendant les premières années, le comité de rédaction peine à se stabiliser. En 1880, le secrétaire de rédaction n'est autre qu'Édouard Hospitalier, déjà grand contributeur au journal dans le domaine de l'électricité, qui remplace Géraldy. Cette collaboration ne dure qu'un temps, puisqu'en octobre 1880 Hospitalier quitte ses fonctions de secrétaire. Il occupera la même position dans la revue concurrente, *L'Électricien*, à partir de 1881.³

Dans la table des matières du premier volume, le journal justifie pleinement son nom : sur près de 300 entrées, un tiers concerne la lumière. Ces entrées regroupent d'une part les applications de l'électricité pour l'éclairage de lieux publics (gares, ports, bâtiments officiels, ...), avec les systèmes déjà en fonction ou les tentatives effectuées, et d'autre part les descriptions de systèmes, avec les lampes en elles-mêmes (procédé Edison, système Jablochhoff, bougie

1. Beltran 2016, p. 56.

2. *LE* 1879.

3. À partir du numéro du 1^{er} novembre, aucun secrétaire de rédaction n'est mentionné dans l'en-tête du journal. Les numéros à partir du 1^{er} janvier 1883 mentionneront Théodore du Moncel comme directeur scientifique.

électrique Jamin, ...) mais également les machines d'alimentation de ces lampes, qui sont souvent abordées (machine Gramme, machine Siemens, ...). Notons que les machines électromécaniques sont principalement considérées comme « machines à lumière », donc comme génératrices. Les moteurs électriques sont très peu présents (quatre entrées).⁴

La transmission de signaux électriques est également bien représentée, un quart des entrées traitent du télégraphe, du téléphone ou du microphone. Essais et installations définitives de câbles télégraphiques, mais également les recherches en cours sur ces systèmes. On trouve d'ailleurs une mention du « procès relatif au téléphone Bell en Amérique », sur la controverse de paternité (voir Introduction p. 25 en note). Les entrées plus caractéristiques d'un journal théorique, comme les articles théoriques ou les bibliographies d'ouvrages, sont relativement peu fréquentes (11%), avec des études sur les résistances électriques, les condensateurs, ainsi que sur les phénomènes météorologiques (feux de Saint-Elme). De la même façon, les applications de forte puissance (chemins de fer, torpilles sous-marines) sont peu nombreuses (5%). S'il y a bien une catégorie « faits divers » regroupant quelques questions financières (impôt sur l'électricité, accidents), le journal n'inclut pas encore ce qui deviendra une catégorie majeure dans les années suivantes : les créations et bilans des compagnies électriques qui vont fleurir dans de nombreux pays.

Le journal continue de gagner en popularité, et augmente le nombre de pages par numéro, pour passer de 32 à 40. Cornélius Herz, qui occupe désormais la fonction officielle de directeur, justifie cette augmentation : « La quantité de travaux sérieux qui se pressent, tant en France qu'à l'étranger, la part trop petite faite dans nos colonnes aux exposés théoriques, l'extension toujours croissante de la science, tout nous impose cet agrandissement ».⁵ Un volume représente désormais trois mois, contre quatre jusqu'à présent. Théodore du Moncel continue d'occuper la direction scientifique du journal jusqu'à son décès, en février 1884. Par la suite, le poste de secrétaire de rédaction est occupé par Auguste Guérout, licencié ès sciences et préparateur au muséum d'histoire naturelle, jusqu'en février 1886,⁶ puis par Bélisaire Marinovitch, licencié ès sciences et ingénieur des Arts et Manufactures d'origine serbe, qui sera nommé Chevalier de la Légion d'Honneur en 1896, et président de la Compagnie française du Rio Sinu, entreprise d'exploitation agricole en Colombie (son fils, Pierre Marinovitch, sera l'un des « as de la grande guerre »).⁷

La présence de Marinovitch comme secrétaire de rédaction est mentionnée dans le journal

4. *LE* 1879, pp. 241-4.

5. *LE* 1884. Ce n'est qu'à partir de janvier 1884 (vol. XI n° 1) que Herz est mentionné dans l'en-tête comme directeur.

6. Notons ici que la seule mention du grade de Guérout a été trouvée sur l'ouvrage : Guérout 1875.

7. Source : Base Léonore, Dossier LH/1743/24.

jusqu'en décembre 1886. À partir de 1887, seul le directeur Cornélius Herz est cité. Remarquons ici la place croissante que ce dernier occupe dans l'en-tête du journal : non cité jusqu'en 1883 ; mentionné comme directeur au début de l'année 1884, à égale importance avec le directeur scientifique du Moncel ; puis prévalant sur les secrétaires de rédaction ; enfin seul responsable indiqué à partir de 1887.⁸ Il semble donc que Herz occupe une place de plus en plus importante dans la gestion du journal. Mais en 1894, une affaire politique marque un tournant : le scandale de Panama.

Rappelons les grandes lignes de cette affaire qui a ébranlé le monde politique français à la fin du XIXe siècle :⁹ l'ingénieur français Ferdinand de Lesseps, auréolé de son succès dans la construction du canal de Suez (ouvert en 1869), lance en 1879 un projet de construction d'un canal au Panama, pour relier les océans Atlantique et Pacifique. Les premières souscriptions lancées, pour réunir les fonds nécessaires, sont insuffisantes. Une large série de conférences et de publications est entamée, au cours de laquelle la presse, entre autres, bénéficie de ce que Jean-Guy Degos et Christian Prat appellent dans leur article des « largesses »,¹⁰ manœuvres courantes à l'époque. Mais le projet, mal préparé dans un environnement différent de ce que les Français connaissaient en Égypte, fait face à plusieurs obstacles (maladies, instabilités politiques locales, conditions climatiques, ...) et la crise financière s'annonce.

Pour subvenir aux besoins d'argent, Lesseps lance de nouvelles souscriptions, mais il a pour cela besoin de l'appui de responsables politiques. Proches des milieux politiques, Jacques de Reinach et Cornélius Herz soudoient certains députés, notamment de la majorité. Reinach aurait ainsi distribué plus de quatre millions de francs (rappelons, à titre de comparaison, que les bénéfices de l'Exposition de 1881 s'élevaient à 700 000 francs). Le projet échoue, et Lesseps annonce la fin des travaux en décembre 1888.¹¹ Quelques années plus tard, le scandale éclate réellement après que le gouvernement, sous la pression des députés, a décidé d'ouvrir une enquête. Un procès pour escroquerie est lancé, puis un autre pour corruption en mars 1893. Reinach et Herz sont accusés, le premier étant jugé par contumace après son suicide en novembre 1892. Herz s'exilera en Angleterre, à Bournemouth, où il mourra en 1898.

8. Les indications sont faites en se fondant sur les en-têtes du journal aux différentes dates indiquées. Les polices d'impression utilisées nous servent à justifier cette prédominance.

9. Sur le scandale de Panama voir : Degos et Prat 2008.

10. *Ibid.*, p. 312.

11. La compagnie est à ce moment-là en faillite et multiplie les appels de fonds. La demande de Lesseps de prorogation des dettes est acceptée par le gouvernement mais rejetée par la chambre des députés. Dans leur article, Degos et Prat désignent les responsables du projet comme des « professionnels de l'amateurisme » (voir Degos et Prat 2008, p. 317, expression qu'ils reprennent d'un autre auteur).

Vers une nouvelle référence ?

Pour le journal *La Lumière Électrique*, au sein duquel Herz avait pris une importance croissante, la situation de ce dernier a forcément des conséquences majeures. Le dernier numéro de *La Lumière Électrique* est publié le 11 août 1894. Mais l'absence n'est que de courte durée : le 15 septembre, survient la publication du premier numéro d'un nouveau journal, *L'Éclairage Électrique*, avec un sous-titre simple : *Revue d'électricité*. Le journal reste hebdomadaire, avec un format un peu plus long puisque chaque numéro fait 48 pages. La direction est confiée dans un premier temps à Pierre-Hugo Ledebor,¹² docteur ès sciences, alors préparateur et chargé de cours à l'université de la Sorbonne, qui contribuait régulièrement au journal *La Lumière Électrique*. Avec l'année 1895, le directeur reste officiellement Ledebor, mais c'est le directeur scientifique, en la personne de Jules Blondin, qui est mis en avant.¹³ Le nouveau directeur scientifique Blondin n'est pas un novice : agrégé de l'université, Blondin a rédigé plusieurs cours de Poincaré, et notamment celui portant sur les « Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière » (second semestre 1888-89) publiés dans le premier volume du livre *Électricité et optique*.¹⁴

Le choix de Blondin comme directeur scientifique n'est pas si étonnant : il était également un auteur régulier de *La Lumière Électrique*, avec cinq articles entre 1891 et 1894, et deux autres dans les premiers mois de *L'Éclairage Électrique*. Comme nous le montrerons plus loin, il est difficile de ne pas voir derrière Blondin le rôle de Poincaré. En avril 1897, le voile se lève sur ce qui était probablement l'organisation du journal depuis sa création : l'en-tête ne mentionne plus un seul « directeur scientifique », mais une « direction scientifique » de plusieurs membres.¹⁵

Du point de vue de la carrière académique, le nouveau comité officiel a d'ailleurs fière allure : Alfred Cornu, professeur de physique à l'École Polytechnique ; Arsène d'Arsonval, médecin, physiologiste et professeur au Collège de France ;¹⁶ Gabriel Lippmann, professeur à

12. Peu de notes ont été retrouvées à son sujet, on peut citer le *Journal d'agriculture Tropicale*, 1903, n°25, p. 198.

13. Le nom du directeur est indiqué dans l'en-tête du journal jusqu'au 2 février, puis est remplacé par le directeur scientifique Jules Blondin à partir du 23 février. Précisons ici qu'à partir de janvier 1895 le sous-titre de la revue devient *Revue hebdomadaire d'électricité*, ce qui ne représente pas une nouveauté puisque le journal était déjà... hebdomadaire.

14. Sur les cours de Poincaré voir le chapitre suivant. Blondin a rédigé les cours « Théorie mathématique de la lumière » (premier semestre 1887-88), « Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière » (second semestre 1887-88), « Thermodynamique » et « Capillarité » (resp. premier et second semestre 1888-89).

15. *L'Éclairage Électrique* 1897, p. 145.

16. Voir : Chevenard 1951.

la Sorbonne ; Henri Poincaré, professeur à la Sorbonne ; Alfred Potier, professeur d'électricité à l'École des Mines et ancien professeur de physique à Polytechnique, tous membres de l'Institut des Sciences, auxquels s'ajoute Jules Blondin, qui garde sa place parmi la direction scientifique.¹⁷ Précisons que tous ces scientifiques n'étaient pas forcément en lien avec le journal avant cette formation : Lippmann et d'Arsonval étaient de gros contributeurs à *La Lumière Électrique* avec entre 1880 et 1890 une quinzaine d'articles indépendants pour le premier, et plusieurs grandes séries d'articles (parfois dix articles pour une même série !) pour le second. À l'inverse, Cornu, Potier et Poincaré n'ont jamais publié d'articles originaux dans *La Lumière Électrique*.¹⁸ D'autre part, Cornu, Lippmann et Potier font partie, la même année, du comité de publication du *Journal de Physique*.

Un autre changement important survient lors du deuxième trimestre de l'année 1897. À partir de ce volume, le journal intègre dans son édition des suppléments, de huit pages chacun, qui regroupent des informations diverses : nouvelles sur des installations électriques en France ou à l'étranger, réglementations et lois sur l'électricité, mentions d'assemblées générales de sociétés électriciennes et syndicats, listes de brevets d'invention, et publicité pour des appareils et instruments (machines à écrire, moteurs, accumulateurs, ...).¹⁹ La création des suppléments, dans le volume même où le nouveau comité de direction scientifique est annoncé, semble plus qu'une coïncidence. Nous ne pouvons que faire l'hypothèse que ce nouveau format est décidé de façon officielle par le nouveau comité.²⁰ Les membres de ce comité sont bientôt rejoints par Démétrius Monnier, professeur d'électricité à l'École Centrale (voir 8.2), qui fait son entrée dans le comité à partir de mai 1897.²¹ Cette configuration subsiste jusqu'à la fin de l'année 1898.

Le premier numéro de 1899 marque un changement important. D'une part, le comité de rédaction est complété par Aimé Witz, docteur ès sciences, ingénieur des Arts et Manufactures et professeur de physique à la faculté des sciences de Lille. Surtout, la revue change de sous-

17. Dans la présentation de l'en-tête, tous les noms sont classés par ordre alphabétique, sauf celui de Jules Blondin, placé à la fin. Nous pensons qu'il faut attribuer à ce choix une valeur de différenciation du rôle de Blondin, précédemment directeur scientifique, et qui garde probablement une certaine autorité, qu'à une distinction sur le grade académique.

18. On retrouve certaines de leurs contributions à travers les comptes rendus de société, notamment les *CRAS*.

19. Dans les volumes trimestriels les suppléments sont regroupés à la fin. Les exemples mentionnés sont tirés de *L'Éclairage Électrique* 1898.

20. Pour certains volumes les suppléments ont été perdus, mais une « table des suppléments » atteste de leur présence. Pour le volume XI en question, l'absence des suppléments ne permet pas de déterminer avec précision à quel numéro les suppléments commencent.

21. *L'Éclairage Électrique* 1897, p. 385.

titre, et devient :²²

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE DES TRANSFORMATIONS

Électriques — Thermiques — Mécaniques

DE

L'ÉNERGIE

La première remarque que l'on peut faire sur ce changement de sous-titre est une généralisation manifeste du champ des publications. L'évocation des transformations thermiques ou mécaniques semble sortir du cadre initial du journal. D'autre part, ce nouveau sous-titre rappelle étrangement le discours de William H. Preece, dans lequel l'ingénieur britannique considérait l'électricité comme une forme de matière pour les physiciens, et d'énergie pour les ingénieurs. En regardant le comité de rédaction du journal, il est néanmoins difficile d'attribuer une place prédominante aux ingénieurs : Blondin, Cornu, Lippmann, Poincaré, Potier sont tous des physiciens enseignants à Polytechnique ou à la Sorbonne. Witz a un statut d'ingénieur autant que de docteur ès sciences, et enseigne à la faculté de Lille. Seul Monnier, ingénieur et professeur à l'École Centrale, évolue dans un cadre plus technique (bien que l'École Centrale soit, comme nous l'avons déjà signalé, une école généraliste).

Ces changements successifs, avec le comité de rédaction en avril 1897, puis le titre en janvier 1899, marquent-ils une vraie transformation du journal ? Lors du changement de comité de rédaction, la table des matières est réorganisée, et les publications sont classées dans des catégories différentes selon qu'elles sont plutôt théoriques ou appliquées. Mais les sous-catégories restent les mêmes, et on retrouve dans les volumes des thèmes communs : Appareils et méthodes de mesure ; Conducteurs ; Diélectriques ; Électrolyse ; Magnétisme ; Oscillations hertziennes ; Rayons Röntgen ; etc. Toutes ces sous-catégories apparaissent avant et après le changement de comité, avec approximativement le même nombre d'entrées. Les comptes rendus des sociétés savantes traitent des mêmes institutions (en particulier la Société Internationale des Électriciens, la Société Française de Physique, et la Société de Physique de Londres). On retrouve également des publications sur les domaines de l'industrie électrique, avec les évolutions de l'éclairage public, de la traction ou des applications mécanique de l'électricité en général. Concernant le changement de titre de la revue au début de l'année 1899, la comparaison est encore plus évidente : les thèmes abordés dans les volumes avant

22. Nous avons essayé de conserver la taille relative des mots du titre. Notons, au niveau de l'impression, que le mot « Énergie » est en majuscules et de la même taille de caractères que le titre *L'Éclairage Électrique*.

et après le changement de titre sont identiques, et la quantité d'articles pour chacun reste stable.²³

Ces changements officiels de statut ne doivent donc pas être perçus comme des changements de direction nets dans la ligne éditoriale du journal. Dans les faits, ils sont une conséquence de la lente transformation vers un journal théorique, transformation qui avait déjà commencé du temps de *La Lumière Électrique*.

10.2 Vers une revue théorique

Comme d'autres revues, généralistes ou spécifiques, *La Lumière Électrique* publie des comptes rendus de sociétés, dont celles que nous évoquions plus haut comme la Société Française de Physique ou l'Académie des Sciences. Des articles repris depuis d'autres sources sont retranscrits, et si besoin traduits. Par exemple les deux mémoires fondateurs de la théorie de Hertz, « Sur les équations fondamentales de l'électrodynamique pour les corps immobiles » et « Sur les équations fondamentales de l'électrodynamique pour les corps en mouvement » sont intégralement repris, respectivement en juillet et décembre 1890, trois mois après leur publication en Allemagne.²⁴

Mais la caractéristique du journal est que la transmission des idées sur ces théories se fait surtout par la rédaction d'articles originaux. Les premières années marquent les balbutiements d'un journal publiant des articles théoriques, sans réelle construction, constituant plutôt des essais isolés. Dès 1889, plusieurs articles ayant trait à différentes théories électromagnétiques sont publiés et forment les débuts d'une diffusion cohérente. En prenant l'exemple de certains articles, nous montrons que sous l'influence d'un petit groupe d'auteurs, la revue affiche la volonté d'expliquer les théories déjà établies, tout en s'intéressant aux nouvelles idées plus récentes. Les articles que nous mentionnons ne représentent pas une liste exhaustive de toutes les publications originales d'électromagnétisme, mais ce sont ceux qui illustrent le mieux cette volonté de diffusion. De plus, la publication de séries d'articles, qui constituent de véritables cours par correspondance, devient un concept récurrent. Enfin, cette extension vers le domaine de la théorie s'accompagne d'articles qui sortent de la diffusion simple, et affichent des caractères prometteurs.

23. Comparaisons effectuées entre les tables des matières des deux volumes encadrant le changement de comité de rédaction en avril 1897 : *EE*, vol. X (1897) et *EE*, vol. XI (1897) et entre les tables des matières du premier volume de l'année 1898 et du premier volume de l'année 1899 : *EE*, vol. XIV (1898), *EE*, vol. XVIII (1899).

24. Hertz 1890 (a) et (b).

Les débuts d'un journal technique : entre flou et incompréhension

Pendant les premières années d'existence du journal, on trouve parmi les articles publiés diverses approches de théories des phénomènes électriques, ou des mentions du rôle de l'éther, sans réelle référence à une théorie particulière. Ces articles sont plus souvent des essais, dans lesquels les auteurs mettent en avant leur propre idée de l'électricité. Par exemple, dans le numéro de février 1881, un auteur luxembourgeois, M. de Waha, fait part de son avis sur les phénomènes électriques.²⁵ Dans son premier paragraphe sur la « génération de l'électricité », il suppose que « les mouvements moléculaires, de quelque forme qu'ils soient, sont désignés sous le nom de vibrations, l'éther est considéré comme le véhicule servant à la transmission des vibrations moléculaires ». ²⁶ La conception de l'éther qui est faite ici nous semble parfaitement représentative d'un journal technique : l'éther n'est pas défini mais l'auteur admet que le lecteur connaît son existence et sait qu'il est le siège de divers phénomènes (sans que ceux-ci n'aient à être réellement justifiés). Notons que le directeur scientifique Théodore du Moncel ajoute une introduction à l'article, en justifiant la publication d'idées nouvelles : ²⁷

S'il est bon d'accueillir avec une extrême réserve les théories nouvelles, qui ne sont souvent que des idées lancées un peu prématurément, il est cependant du devoir des journaux scientifiques d'ouvrir leurs colonnes aux travaux sérieux qui, tout en s'écartant un peu de la voie suivie, tendent à montrer un horizon nouveau à explorer.

Il précise également dans son introduction qu'il laisse « la responsabilité de son œuvre » à l'auteur.

Ces mentions de l'éther sans réelle définition se retrouvent régulièrement, notamment dans des articles qui portent sur la nature de l'électricité. Dans un article sur la réfraction du courant électrique, Auguste Guérout (qui deviendra secrétaire de rédaction) s'intéresse à l'angle de réfraction du courant entre deux milieux électrolytiques. Les dépendances de cet angle, en fonction des conductivités des milieux, l'amène à remarquer la similitude entre l'électricité et les phénomènes de lumière, de chaleur et du son. Il conclut : ²⁸

25. Waha 1881

26. *Ibid.*, p. 111.

27. *Ibid.*, p. 110.

28. Guérout 1881, p. 333.

Un point certainement fort intéressant dans ce sens, serait la comparaison entre les indices de réfraction électrique et les indices de réfraction lumineuse pour les mêmes milieux ; on trouverait là sans doute une relation simple, et qui établirait nettement un rapport entre le mouvement vibratoire de l'éther et le mouvement électrique, lorsque ces mouvements s'effectuent dans des milieux susceptibles de leur opposer plus ou moins de résistance.

Une fois encore, l'éther n'est pas défini dans le reste de l'article ; l'auteur semble y faire référence pour la propagation de la lumière.

Sur cette première période du journal, un seul article donne une définition claire et nette de l'éther et de ses attributions. Il est publié en décembre 1882, et dû à Ernest Mercadier, « ingénieur-électricien » comme Théodore du Moncel, et directeur des études à Polytechnique. Dans cet article, « Études sur les éléments de la théorie électrique », ²⁹ l'auteur s'intéresse à la création de « masses électriques » pour évaluer la validité de la loi de Coulomb pour l'électrostatique. Dans son raisonnement, Mercadier est amené à discuter de la nature du fluide dont sont constituées les masses électriques. Il donne les analogies entre les grandeurs électriques et celles d'un fluide, comme le potentiel électrique et la pression. Sur ce point, il mentionne l'idée première de Maxwell, qui attribue aux diélectriques des propriétés analogues à celles d'un milieu élastique.

Mercadier discute ensuite la nature de ce fluide électrique : ³⁰

L'idée d'un *fluide* électrique admise on ne peut plus songer à un fluide *spécial* ; l'idée des deux fluides électriques spéciaux et même celle du fluide unique de Franklin, sont aujourd'hui certainement abandonnées, et le jour où l'on pourra faire disparaître cette conception de l'enseignement élémentaire de l'électricité, on aura réalisé un grand progrès. Mais on peut songer à un fluide résultant d'un degré considérable de raréfaction de la matière ordinaire, ou plutôt à celui qu'en admet aujourd'hui comme l'agent des radiations lumineuses et calorifiques, l'éther.

Ce passage, qui donne une définition claire de l'éther comme vecteur de la lumière (et des « rayonnements calorifiques », soit les infrarouges), est suffisamment rare dans *La Lumière Électrique* pour être souligné. Remarquons au passage la critique de Mercadier envers la tradition française de l'enseignement des fluides électriques. Sa nouvelle fonction de directeur des études à Polytechnique, école au sein de laquelle nous avons mis en avant une certaine

29. Mercadier 1882.

30. *Ibid.*, p. 594.

inertie au niveau de l'enseignement (voir 6.4), laisse à penser que cette remarque n'est pas faite de manière fortuite. Dans sa conclusion, Mercadier évoque tous ces phénomènes électriques et lumineux, en disant que « les faits et les idées que nous venons de développer ne sont pas nouveaux ; mais il ne paraîtra peut-être pas inutile à un certain nombre de lecteurs de ce journal de les voir rapprochés et groupés ». ³¹

Cette remarque de Mercadier est parfaitement fondée. Les références constantes à l'éther sans réellement lui attribuer un rôle précis sont effectivement source de questionnement chez les ingénieurs en électricité. Les lettres des lecteurs publiées par le journal reflètent parfois cette incompréhension par rapport à un concept pas toujours maîtrisé. L'une de ces lettres est particulièrement explicite. Il s'agit d'un courrier d'« étudiants électriciens » (sans donner d'établissement précis) publié en mai 1885 et donné en annexe (voir Annexe n° 11), en réponse à un discours du physicien allemand Rudolf Clausius repris dans le journal quelques semaines auparavant. ³² Dans ce discours, Clausius évoquait le rôle de l'éther, supposé comme étant un milieu de propagation élastique pour établir les équations décrivant la propagation de la lumière. Il mentionnait avant tout l'hypothèse de Huyghens, selon laquelle la sensation de *vision*, produite sur l'œil humain, ne pouvait être due qu'à une matière subtile, d'où l'introduction par le hollandais de l'éther.

C'est contre cette assertion que s'élève le groupe d'étudiants, dont l'auteur de la lettre Jules Bourdin. ³³ Dans le développement de la missive, Bourdin fait valoir le rôle prédominant accordé aux atomes, dans la théorie chimique, et aux vibrations atomiques, comme dans la théorie de la chaleur. Il justifie, par des raisonnements mécanistes, qu'une place similaire pourrait leur être accordée dans la propagation de l'électricité. Il critique vertement les idées enseignées sur la nature de l'électricité : ³⁴

Nous pensons, nous, que cela est très regrettable d'entendre dire : « *Quelle que soit la nature de l'électricité, j'en prends une certaine quantité que j'appelle m* » attendu que c'est affirmer que l'électricité est, en tout cas, une *matière quelconque* et une fois la craie en main, on a bientôt couvert le tableau de formules qui ne satisfont généralement que celui qui les a écrites. Nous avons pensé plus admissible de supposer que le soi-disant courant électrique n'était qu'un mouvement vibratoire du fil métallique qu'on appelle le conducteur.

31. *Ibid.*, p. 595.

32. Il s'agit du discours prononcé par Clausius lors de son élection à la qualité de doyen de la faculté des sciences de Bonn. Publié dans le journal : Clausius 1885.

33. Jules Bourdin, auteur de quelques articles dans le journal *La Lumière Électrique*, écrit notamment une biographie d'Édouard Blavier. Voir : Butrica 1986.

34. Bourdin 1885, p. 421. les italiques sont de Bourdin.

La signature de la lettre est particulièrement intéressante : « Pour le groupe d'étudiants électriciens qui ont eu l'honneur de vous être présentés en 1881, et dont le cri de ralliement est : À BAS L'ÉTHER ! ». La mention de 1881 fait probablement référence à l'Exposition Internationale d'Électricité, où de nombreux étudiants sont venus. Surtout, cette signature montre que parmi les jeunes ingénieurs électriciens il y a des mouvements s'élevant contre le rôle de l'éther, et dont l'idée centrale est cette négation de la nécessité même de l'éther, dans la propagation de la lumière ou de l'électricité. Dans la lettre, l'auteur axe vraiment son propos sur le mouvement vibratoire des atomes. Il y a donc des ingénieurs électriciens qui ne se contentent pas de refuser l'éther en lui préférant des notions plus utilisées en pratiques, certains le nient pour des raisons plus fondamentales et se questionnent sur la nature même de l'électricité et de sa propagation.

L'éther apparaît donc régulièrement dans des articles originaux du journal, mais sans être réellement défini. De la même façon, la théorie de Maxwell fait une entrée timide dans le panorama scientifique français. C'est au travers de notes de l'étranger, en particulier du correspondant anglais John Munro, que l'on en trouve quelques traces à partir de 1882. Dans une note publiée en janvier 1885, Munro évoque « la vision de l'électricité » et les idées de Maxwell et FitzGerald, considérant l'électricité comme un fluide incompressible.³⁵ Dans un autre volume de l'année 1885, on trouve une mention de la théorie de Maxwell dans la catégorie « Revue des travaux récents en électricité », dans un article sur les « mesures du pouvoir rotatoire magnétique des corps en unités absolues »,³⁶ mémoire écrit par Henri Becquerel, présenté devant l'Académie des Sciences en juin 1885 et publié également dans les *Annales de Chimie et de Physique*.

Le premier article à donner une idée claire du rôle de Maxwell est publié en juillet 1886. Il est écrit par Adrien Palaz, ingénieur suisse diplômé de l'École Polytechnique Fédérale de Zurich (1884) et docteur ès sciences physiques (1886). Palaz sera attaché pendant deux ans au Bureau International des Poids et Mesures de Sèvres entre 1886 et 1888, où il fréquente probablement son compatriote Charles-Édouard Guillaume, avant d'obtenir la chaire « d'électricité industrielle et magnétisme » à l'Université de Lausanne, et d'y créer le laboratoire d'électricité industrielle.³⁷ Dans son article « Recherches expérimentales sur la capacité inductive spécifique de quelques diélectriques », Palaz s'intéresse entre autres à la vérification de la formule de Maxwell, qui pose l'égalité de la capacité spécifique et du carré de l'indice

35. Munro 1885.

36. Becquerel 1885.

37. Source : Base Léonore, dossier 19800035/568/64644.

de réfraction ($\epsilon_r = n^2$). À cette occasion il évoque le rôle de Maxwell, le savant écossais « traduisant en formules mathématiques l'hypothèse de Faraday que l'action électrique s'exerce par l'intermédiaire du milieu qui est entre les molécules par un état de déformation », et en a tiré « la conclusion que les phénomènes optiques ne sont que de simples phénomènes électro-magnétiques, c'est-à-dire que les ondulations de l'éther sont identiques avec des courants électriques ». Bien que très bref, ce résumé est le premier publié dans le journal *La Lumière Électrique* qui donne une idée claire de la démarche de Maxwell.³⁸

L'une des raisons de cette arrivée tardive réside peut-être justement dans cette traduction mathématique. En janvier 1885, l'ancien secrétaire de rédaction Franck Géraldy fait la revue bibliographique du *Traité d'électricité et de magnétisme* traduit par Séligmann-Lui.³⁹ Il cherche justement à expliquer les difficultés de transmission jusqu'en France. La première et la plus grande, nous dit-il, « c'est le système de notations et de calculs algébriques particuliers dont Maxwell fait usage, qui est, comme on le sait, le calcul des quaternions inventé par Hamilton. Ce mode de calcul n'est pas usité dans notre pays ». Plus que le niveau mathématique du livre de Maxwell, l'auteur met en avant la nouveauté de ces concepts en France. Cette justification peut être valable dans le cas d'un lectorat peu rompu aux mathématiques, mais pour des ingénieurs sortant de Polytechnique, l'algèbre de Maxwell, bien que nouveau, ne doit pas constituer un obstacle insurmontable. La seconde raison que l'auteur met en avant a été souvent mentionnée : c'est cette disparité qui existe au sein même de l'ouvrage, qui mêle plusieurs directions. L'auteur souligne d'ailleurs que Maxwell a cherché à recomposer son *Traité*, mais son décès survenu trop tôt l'a empêché de fournir un ouvrage plus cohérent.

Une volonté de diffusion

Les premiers articles publiés sur les théories électromagnétiques viennent surmonter ces deux raisons : ils proposent un exposé cohérent, et utilisent un formalisme plus habituel pour les Français. Ils marquent une véritable volonté d'explication envers un lectorat plus large que les spécialistes du domaine. Nous ne détaillerons pas précisément ces articles, à l'exception du tout premier article de Ledebœr, et d'un article de Jules Blondin spécifiquement dédié à l'éther ; nous insisterons surtout sur les grands traits qui en ressortent.

Le premier article original sur les théories électromagnétiques est publié en juillet 1889 par Pierre-Hugo Ledebœr, — qui sera plus tard le directeur scientifique du journal comme nous l'avons vu plus haut. Cet article, intitulé « Sur les équations générales du mouvement de

38. Palaz 1886, p. 100.

39. Géraldy 1885.

l'électricité » est assez long et réparti sur six numéros,⁴⁰ il constitue ce que nous appellerons une série (point sur lequel nous reviendrons plus loin). Dans son introduction, Ledebøer justifie sa démarche : il reconnaît que la théorie électromagnétique de la lumière due à Maxwell ne peut expliquer tous les phénomènes, mais qu'elle présente certains avantages, et met en avant la création d'ondes électromagnétiques par Hertz. Soulignons ici que Ledebøer date cette théorie de 1865, sans donner de référence à un mémoire particulier. Il se base donc, sauf erreur de sa part, sur le mémoire *Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. Nous retrouvons le même trait que chez Vaschy, qui date la théorie électromagnétique de la lumière de 1865 (voir 8.2 p. 236). Dans la suite de son introduction, Ledebøer insiste sur le fait qu'il est nécessaire de chercher à expliquer les idées du Britannique :⁴¹

Nous croyons donc qu'une étude d'ensemble sur l'état actuel de la théorie électromagnétique de la lumière offre un intérêt considérable aux personnes, plus nombreuses qu'on le croit souvent, qui sont assez familiarisées avec l'écriture mathématique pour suivre les développements de cette théorie.

Ce travail d'examen général nous paraîtrait d'autant plus opportun que la plupart des mémoires dont nous aurons à nous occuper sont disséminés dans des recueils étrangers et n'ont pas été traduits. Nous ferons observer en outre que le traité de Maxwell date de 1873 et que, depuis cette époque, il y a eu de nombreuses publications à ce sujet.

Soulignons dans ce passage certains points importants, qui se retrouvent chez plusieurs auteurs du journal. La volonté de diffusion est clairement explicite, et elle s'adresse à des personnes ayant une formation mathématique suffisante. Les ingénieurs que nous considérons, ayant suivi une formation académique, sont donc tout à fait aptes à comprendre ces articles. D'autre part, Ledebøer souligne que les articles traitant de Maxwell sont assez peu nombreux en France, il y a donc un travail de synthèse qui est proposé. Lorsqu'il parle de « nombreuses publications », Ledebøer ne donne aucune référence précise. Dans le journal *La Lumière Électrique*, nous avons vu que peu d'articles étaient dédiés à ces théories.

Dans son article Ledebøer commence par établir la loi d'Ampère, donnant l'interaction entre deux éléments de courants (voir 1.2 p. 48). Il en déduit le potentiel d'interaction entre deux courants, qu'il généralise en donnant la formule de Helmholtz.⁴² Il remarque que, dans

40. Ledebøer 1889.

41. Ledebøer 1889, p. 158.

42. Dans la théorie de Helmholtz le potentiel électrodynamique \mathbf{A} créé par un courant \mathbf{j} est : $\mathbf{A} = \frac{1}{c} \mathbf{j} * \frac{1}{r} + \frac{1-k}{2} \nabla \xi$, où $\xi = -\frac{1}{c} \mathbf{j} * \nabla r$ et $*$ l'opérateur produit de convolution tel que $f * g(r) = \int f(t)g(r-t)dt$.

cette formule de Helmholtz pour le potentiel, la valeur attribuée à la constante k , qui intervient dans l'expression du potentiel (voir note) permet de retrouver les résultats de plusieurs théories (Maxwell pour $k = 0$, Weber pour $k = -1$ et Neumann pour $k = 1$, voir 4.1 p. 100), ce qu'il démontre ensuite pour Weber et Neumann.

Ledeboer n'aborde la théorie de Maxwell que tardivement. Il souligne que la méthode du Britannique est « entièrement différente de celle suivie par Helmholtz », et insiste particulièrement sur la grande distinction, « c'est que Helmholtz admet l'action à distance, tandis que pour Maxwell l'action réside dans le milieu lui-même ». Suivant la démarche de Maxwell dans sa démonstration dynamique, Ledebor introduit le potentiel vecteur \mathbf{A} de deux systèmes de courants. Il démontre les relations entre le potentiel vecteur et l'induction magnétique \mathbf{B} , puis entre le potentiel vecteur et la force électrique \mathbf{E} .⁴³

Dans sa conclusion, il mentionne l'analogie entre les équations de Helmholtz et celles de Maxwell. Il se limite aux équations de Maxwell reliant les différentes grandeurs, sans vouloir aborder la théorie électromagnétique de la lumière :⁴⁴

Les équations précédentes [servent] de base à la théorie électromagnétique de la lumière ; le développement de cette théorie, surtout après les découvertes récentes de M. Hertz, forme un des sujets les plus attrayants de la physique moderne, mais cette étude sortirait un peu trop, croyons-nous du cadre de ce journal pour qu'on puisse en entreprendre le développement ici.

Ce premier article permet d'illustrer la nouvelle vague qui va être publiée au sein du journal. Les théories de l'électromagnétisme y sont abordées de façon claire, et avant tout dans un but d'explication. Si la conclusion de Ledebor laisse entrevoir quelques questionnements sur la pertinence d'aller trop avant dans l'étude théorique, ces doutes s'estomperont peu à peu.

D'autres auteurs vont se distinguer dans la publication de ces articles, à commencer par Camille Raveau. Jeune physicien, qui a notamment suivi les cours d'électromagnétisme de Poincaré à la Sorbonne en 1889-1890, Raveau deviendra secrétaire de rédaction des *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* pendant plus de 40 ans (1904-1946). Il laissera en physique le diagramme éponyme en thermodynamique.⁴⁵ Raveau publie en février 1891 un premier

43. Ledebor 1889, p. 507-10. La démonstration que donne Ledebor est très proche de celle que nous proposons (voir 2.4 p. 71).

44. *Ibid.*, p. 158.

45. Pour les éléments biographiques voir : Walter 2007, p. 317, et Base Léonore, dossier 19800035/1234/42328. Le diagramme de Raveau est, pour les machines thermiques dithermes, la représentation d'un transfert de chaleur en fonction de l'autre (en général source chaude en fonction de source froide).

article « Exposé sur la théorie électromagnétique de Maxwell », qu'il débute par une considération sur les travaux de Maxwell, se basant sur des idées de Faraday peu enseignées en France. À propos de Maxwell, il nous dit :⁴⁶

Son but était, comme il l'a répété souvent, de donner une expression mathématique aux idées de Faraday, qui sont peut-être familières aux étudiants d'outre-Manche, mais qui ne sont pas très répandues chez nous. De là résulte que certains chapitres paraissent peu intéressants et qu'on ne voit pas nettement, à la première lecture, la suite naturelle des idées.

L'opinion qu'il donne sur les idées des étudiants en France et en Angleterre est très intéressante, puisque Raveau, étudiant peu de temps avant, est alors l'un des mieux placés pour en parler. En fait, on retrouve dans cette introduction une remarque que Poincaré fait en ouverture de son cours *Électricité et Optique* (voir 11.2 p. 342), à la fois sur le caractère « inhabituel » des travaux de Maxwell aux yeux des physiciens français, et également sur les incohérences qui peuvent exister dans l'œuvre même de l'Écossais.

La présentation que Raveau fait de Maxwell dans son article est très scolaire, abordant successivement les différents domaines (électrostatique, magnétisme, électromagnétisme, induction, ...). Il poursuit cet article avec un complément, quelques semaines plus tard, dans lequel il insiste uniquement sur certains points particuliers : la vision des diélectriques chez Maxwell, la différence avec la théorie de Mossotti, le champ magnétique produit par un courant, et l'induction. Sur ces points il développe les conséquences des idées de Maxwell, en s'attardant beaucoup moins sur les notions basiques que dans son premier article.⁴⁷

Les articles de Ledebøer, en bonne partie sur Helmholtz, et ceux de Raveau sur Maxwell, inspirent un troisième auteur. Bernard Brunhes, préparateur à la Sorbonne (voir page 275), rédige en avril 1891 un article « Sur la différence entre l'électrodynamique de Helmholtz et celle de Maxwell ».⁴⁸ Brunhes se base en partie sur le cours de Poincaré portant sur les théories de Helmholtz, cours qu'il a lui-même rédigé. Dans son article, il cherche vraiment à comparer, sur plusieurs points, les raisonnements de Helmholtz et de Maxwell, et ne se contente pas d'établir séparément les lois respectives aux deux théories, comme le faisait Ledebøer. Il évalue les similarités et différences à chaque fois qu'il introduit une grandeur,

Il permet notamment d'identifier clairement les différents comportements thermodynamiques (moteur, récepteur, cycle impossible, ...).

46. Raveau 1891 (a), p. 351.

47. Raveau 1891 (b).

48. Brunhes 1891.

comme le potentiel vecteur qui est un concept central chez Maxwell, alors que Helmholtz définit un vecteur analogue à partir du potentiel thermodynamique.⁴⁹

D'ailleurs, Brunhes ne fait pas que recopier, il apporte aussi un esprit critique. Après avoir discuté de la loi des courants chez Weber et Neumann, que Helmholtz réunit en une formule commune (voir l'article de Ledebor), Brunhes déclare :⁵⁰

Maxwell a considéré l'électrodynamique à un point de vue tout différent. Pour lui, tous les courants sont fermés : les courants instantanés qui se produisent, par exemple, au moment de la décharge d'un condensateur, se ferment pour lui à travers le diélectrique. Une expérience ne pouvant jamais nous donner que des courants fermés, c'est une recherche non seulement impraticable, mais vaine, que celle de l'action d'un élément de courant. On éprouve donc quelque surprise en voyant Helmholtz déclarer qu'on retrouve l'électrodynamique de Maxwell en donnant simplement à son paramètre arbitraire k la valeur particulière 0. Nous verrons que quelques-uns des résultats de Maxwell s'obtiendraient effectivement en donnant à k cette valeur 0, mais la condition $k = 0$ n'est pas suffisante pour retrouver l'électrodynamique de Maxwell. [...] La condition $k = 0$, ainsi que l'a mis en évidence M. Poincaré, n'est même pas nécessaire, et l'électrodynamique de Maxwell, qui ne rentre dans celle de Helmholtz que comme un cas limite, s'en déduit d'une façon toute différente.

Dans la suite de son article, Brunhes montre que ce passage d'une théorie à l'autre en prenant $k = 0$ ne suffit pas, en particulier dans la conception des diélectriques (chez Maxwell, le vide est un milieu polarisable, alors que chez Helmholtz c'est le milieu impolarisable de référence). Précisons, sur cette question du milieu de référence, que dans les trois articles traitant de Maxwell que nous venons de citer, le terme « éther » n'est à aucun moment employé. Le rôle du milieu intermédiaire est bien mis en avant, mais l'éther reste à l'écart.

Le dernier auteur d'articles sur l'électromagnétisme est Jules Blondin, que nous avons déjà évoqué, qui sera directeur scientifique de *L'Éclairage Électrique*. Il rédige un premier article en juillet 1891 sur la propagation d'une perturbation électrique dans les conducteurs, dans lequel il établit clairement les lois de propagation prédites par la théorie de Maxwell. Il compare ces prédictions avec les résultats des expériences de Hertz et celles de Sarasin et de la Rive.⁵¹ On peut rapprocher cette première publication d'un autre article que Blondin

49. *Ibid.*, p. 16.

50. *Ibid.*, p. 16.

51. Blondin 1891 (a). Les expériences de Sarasin et de la Rive dont parle Blondin sont celles de mars 1891,

rédigera en mars 1894, « Sur la propagation de l'électricité dans les conducteurs », très proche de son premier article.⁵²

Des théories nouvelles

Insistons sur le fait que les articles publiés dans *La Lumière Électrique* s'intéressent à toutes les théories électromagnétiques. On retrouve bien sûr les « anciennes » théories, comme celle de Maxwell ou de Helmholtz, mais également les idées très récentes. C'est le cas dans un article que Blondin rédige en décembre 1891, visant à comparer les résultats prédits non seulement par la théorie de Maxwell, mais également par celle de Helmholtz avec les résultats obtenus d'après les expériences sur la propagation des ondes électromagnétiques (cette fois Blondin ne cite pas d'expériences en particulier). Point intéressant, il donne dans son introduction la référence des articles des trois autres auteurs que nous avons déjà évoqués, de sorte qu'un lecteur puisse facilement se reporter aux numéros en question. Il mentionne également le second volume du cours de Poincaré *Électricité et Optique*, dans lequel Poincaré effectue cette même démarche de comparaison.⁵³

L'exposé que livre Blondin est particulièrement complet : il commence par établir l'expression du déplacement électrique, puis du courant de déplacement, selon la théorie de la polarisation choisie. Il en déduit ensuite les relations entre les composantes (force électrique, force magnétique) qui donnent, dans un cas particulier, les relations de Maxwell. Enfin, il utilise ces expressions pour évaluer la possibilité de propagation d'une onde dans le diélectrique. Sur ce dernier point, Blondin ajoute un exposé de Larmor, que le physicien irlandais a présenté devant la *Royal Society*.⁵⁴ Blondin reprend l'analyse de Larmor, qui montre que la théorie de Maxwell n'est pas la seule à pouvoir servir de base à une théorie électromagnétique de la lumière, mais que les expériences donnant la vitesse de propagation sont favorables à la théorie de Maxwell.

Blondin retrouve d'ailleurs Larmor dans un article de mai 1894, particulièrement centré sur l'éther. Le titre de cet article, « La théorie dynamique de l'éther électrique et luminifère », est une reprise du titre du mémoire de Larmor « *A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium* » publié dans les *Proceedings* de la Royal Society en janvier 1893 (voir

pas encore celles réalisées dans le grand hall de Genève.

52. Blondin 1894 (a).

53. Blondin 1891 (b).

54. Blondin donne pour référence la séance du 14 mai 1891, *Proceedings of the Royal Society*, vol. XLIX, p. 521.

48 p. 119). Le titre de l'article, mentionnant explicitement l'éther, suppose que les lecteurs connaissent déjà le rôle de celui-ci pour l'électromagnétisme et l'optique. Blondin reprend la démarche historique de Larmor, qui liste les différentes hypothèses sur la constitution de l'éther. Ce faisant, c'est un véritable résumé de la constitution de l'éther au XIXe siècle que nous livre l'auteur français. Au début de son article, il donne les enjeux de la nature de l'éther :⁵⁵

Bien que l'existence de l'éther soit universellement admise, il serait cependant impossible dans l'état actuel de nos connaissances, de répondre d'une façon précise à cette simple question : Qu'est-ce que l'éther ? Il est vrai que nous serions tout aussi embarrassés de définir la matière, quoiqu'elle tombe directement sous nos sens et que ses propriétés soient plus anciennement et mieux connues que celles de l'éther.

Il reprend en partie la préface d'Oliver Lodge dans son ouvrage *Les théories modernes de l'électricité*, préface dans laquelle Lodge avance l'espoir de pouvoir prochainement arriver à une théorie de l'éther vérifiant toutes les contraintes (continuité, stabilité, incompressibilité) et permettant d'expliquer la propagation de la lumière et celle des phénomènes électriques. Blondin suit ensuite le cheminement de Larmor, qui dans son ouvrage rappelle les grandes contributions à l'éther optique puis électromagnétique. La conclusion de l'article résume admirablement la démarche entreprise :⁵⁶

Nous avons ainsi parcouru un vaste ensemble de phénomènes appartenant à trois branches différentes de la physique : l'élasticité, l'optique, l'électricité. Parmi les théories proposées pour les expliquer séparément, nous avons particulièrement considéré la théorie des vortex de lord Kelvin, les théories dynamiques de la lumière de Green et de Mac Cullagh, la théorie des phénomènes électriques de Maxwell, à laquelle il faut joindre la théorie du magnétisme d'Ampère. M. Larmor a tenté de rallier ces trois sortes de théories, de ne faire dépendre les trois ordres de phénomènes du mouvement que d'un seul milieu primordial.

Au risque de nous répéter, signalons la nature très particulière de cet article de Blondin. Il se base sur un mémoire publié à l'étranger ce qui, par rapport aux autres journaux qui reprennent régulièrement des mémoires ou des discours (comme le discours de Preece, voir 9.2), ne présente pas une nouveauté. Mais Blondin en fait un « résumé critique », livrant par

55. Blondin 1894 (b), p. 351.

56. *Ibid.*, p. 360.

endroits sa propre interprétation d'une théorie. Il ne se contente pas de résumer un mémoire, il se base dessus dans l'objectif clairement annoncé de donner une histoire des principales théories de l'éther.

La théorie de Larmor, que nous n'avions jamais vue apparaître dans les autres journaux — autrement que dans des comptes rendus de sociétés —, est donc bien abordée dans les articles de *La Lumière Électrique*. La théorie de Hertz, moins présente dans le journal, fait néanmoins l'objet d'une description dans la nécrologie que Bernard Brunhes fait du scientifique allemand en février 1894.⁵⁷ Dans cette nécrologie, Brunhes consacre la moitié de son article à la théorie de Hertz, souvent oubliée au profit des expériences. Il donne le raisonnement de l'Allemand à partir des idées de Faraday et Maxwell, en insistant sur l'une des particularités de la théorie de Maxwell, qui est « la réciprocité parfaite qu'il admet entre l'effet électrostatique d'un champ magnétique variable et l'effet magnétique d'un champ électrostatique variable : c'est à ce point essentiel que s'attache Hertz dans l'œuvre de Maxwell ; pour lui, la théorie de Maxwell est là toute entière ».⁵⁸ Avec les articles de Blondin et Brunhes, on voit donc que les idées nouvelles de l'électromagnétisme sont présentes au sein du journal, dont la théorie de Hertz, et les débuts de la théorie de Larmor. Les idées de Lorentz feront l'objet d'articles plus tardifs.

Outre ces quatre premiers auteurs, qui écriront plusieurs autres articles dans le journal, un dernier contributeur a publié un article particulièrement intéressant pour notre propos. Il s'agit du physicien russe Alexandre Stoletow (1839-1896), qui a notamment travaillé sur l'effet photoélectrique, et est le premier à avoir généré un courant électrique à partir de rayons ultraviolets.⁵⁹ Il publie plusieurs notes dans les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, notamment une sur ce sujet.⁶⁰ En mars 1890, Stoletow publie dans *La Lumière Électrique* un article intitulé « L'éther et l'électricité », que nous allons discuter ici (l'article tiré du journal est donné en annexe, voir Annexe n° 12).⁶¹

Stoletow commence par donner directement les idées de Maxwell sur l'électricité, idées qui « mettent au premier plan l'éther, le même milieu dans lequel se propagent la lumière

57. Brunhes 1894.

58. *Ibid.*, p. 243. La symétrie qu'évoque Brunhes est celle présente entre les équations liant les grandeurs \mathbf{E} et \mathbf{B} , en l'absence de courant de conduction. Il souligne l'absence de cette symétrie dans les anciennes théories, dans lesquelles le terme de courant de déplacement $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ n'existe pas.

59. Voir Sergiyenko et Rodriguez-Quinonez 2016, p. xvii.

60. Stoletow 1888. Cette note est présentée devant l'Académie par Mascart.

61. Stoletow 1890.

et la chaleur ». Pour les travaux de Maxwell, il donne d'ailleurs comme référence, outre le *Treatise* de 1873, le mémoire de 1865 « Dynamical Theory of the Electromagnetic Field » comme Ledebor, ce qui montre que ce mémoire constitue le point de départ pour plusieurs physiciens, pas seulement français. Stoletow souligne ensuite que ce rapprochement entre éther et électricité ne débouche pas sur un simple « contact » mais bien sur une absorption, « le phénomène ondulatoire, appelé lumière, devient un cas particulier de la mécanique de l'éther, qui embrasse un ensemble des phénomènes, qui à l'heure actuelle porte le nom d'*électromagnétisme* ». ⁶² Il poursuit en discutant l'importance d'un milieu intermédiaire pour les actions, notamment pour la transmission de l'énergie : ⁶³

Nous ne pouvons pas nier, a priori, la possibilité d'une transmission directe de l'énergie à travers l'espace, sans l'intervention d'un milieu interposé ; mais nous pouvons affirmer, que si cette action directe a lieu elle doit être instantanée. Telle est peut-être l'attraction universelle. Mais, si nous constatons que la transmission de l'énergie demande un temps fini, même très petit, nous sommes obligés d'en déduire qu'elle s'effectue avec l'intervention d'une matière intermédiaire, et dans les cas où l'observation directe ne nous révèle pas la présence d'aucune matière « ordinaire », nous devons en admettre une autre, une matière « impondérable ».

Une telle justification de la nécessité d'un milieu intermédiaire pour les actions physique est suffisamment rare dans le journal avant 1890 pour être soulignée : l'existence de l'éther, même considéré comme un milieu optique, est justifiée explicitement par Stoletow, alors que les précédents auteurs admettent simplement son existence. Stoletow discute ensuite longuement les propriétés des ondes lumineuses et les conditions posées sur l'éther. Celui-ci a une densité très faible, mais qui « dépasse considérablement » les gaz raréfiés dans le milieu interplanétaire. Il est probablement d'une nature solide, pour pouvoir transporter des ondes transverses, mais Stoletow souligne qu'un corps liquide ayant un mouvement tourbillonnaire peut également les transmettre. Pour expliquer le mouvement des astres à travers l'éther, il suppose que l'éther a un comportement liquide à faible vitesse, mais solide à grande vitesse, et il prend l'exemple du goudron. ⁶⁴ Enfin, l'éther emplit tout l'espace, y compris les espaces interstitiels de la matière, à laquelle il est probablement lié, même faiblement. C'est d'ailleurs cette relation à la matière qui pose certains problèmes. En effet pour Stoletow, l'éther libre

62. *Ibid.*, p. 517. Les italiques sont de Stoletow.

63. *Ibid.*, p. 518. Les guillemets sont de Stoletow.

64. On désigne aujourd'hui par « rhéoépaississant » un fluide ayant cette propriété, l'exemple le plus connu étant le mélange eau-maïzena.

est « probablement la forme la plus simple de la matière », mais la relation à la matière demeure sans réponse.⁶⁵

Sur l'électromagnétisme, Stoletow donne un rapide résumé des idées d'Ampère ainsi que de la théorie des fluides, en expliquant que les différentes théories d'action à distance (il cite la loi de Weber) se sont révélées incorrectes. Il détaille la contribution de Faraday, qui s'est concentré sur le milieu diélectrique entourant un corps conducteur, et a dressé la « topographie » du champ au moyen de lignes de force. Après avoir détaillé la nature de la charge électrique, comme discontinuité de la ligne de force, et la polarisation, Stoletow conclut :⁶⁶

Tous ces faits prouvent que dans les phénomènes électrostatiques, le rôle exclusif appartient au milieu diélectrique. Or « le vide » peut aussi jouer le rôle de ce milieu ; il est, lui aussi, le véhicule de l'énergie électrostatique, car nous savons que ce quasi-vide est rempli d'une matière particulière, l'*éther*. Mais alors le rôle principal dans les diélectriques appartient aussi à l'éther emprisonné ; et les « conducteurs » seront des corps, à l'intérieur desquels l'éther perd sa propriété de se polariser électriquement.

Il poursuit d'ailleurs avec la polarisation en explicitant la nature du courant électrique : « Le courant électrique est un changement de la polarité électrostatique du champ et ce changement est accompagné de forces magnétiques ».⁶⁷

Dans la dernière partie de son article, Stoletow aborde les effets du rayonnement sur la matière, en particulier les rayonnements ultraviolets (qu'il connaît bien), puis les expériences de Hertz, qu'il détaille longuement. Il axe son propos autour d'un élément : « l'énergie électromagnétique, qui se trouve au fond des phénomènes électriques et magnétiques, est l'énergie de l'éther qui remplit tout l'espace ; elle dépend de déformations et de mouvements moléculaires de l'éther, dont les détails nous sont encore inconnus ». Ces « détails » dont parle Stoletow sont pour lui les mécanismes réels de propagation, ce qui se passe « dans chaque cellule de l'éther ».⁶⁸

Dans sa conclusion, il reprend les propos de Jean-Baptiste Dumas, secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, qui avait lors du Congrès des électriciens de 1881 qualifié le XIXe siècle de « siècle de l'électricité ». Sur l'utilisation de ce terme « électricité », Stoletow reprend

65. *Ibid.*, p. 518-19. Stoletow donne même l'origine du mot *éther*, en reprenant l'article de Maxwell dans l'*Encyclopedia Britannica* (voir 2.5), étymologie que nous avons donnée dans l'Introduction générale : le mot viendrait du grec *αἶθερ*, « je brûle », ou de l'idée de mouvement perpétuel, *αἰεθελ*.

66. *Ibid.*, p. 559. Les italiques sont de Stoletow.

67. *Ibid.*, p. 560.

68. *Ibid.*, p. 565-6.

l'idée déjà discutée par Hospitalier dans son article d'un concept qui n'existe pas, ou qui doit tout du moins être parfaitement défini :⁶⁹

Il est temps de s'en émanciper, d'expliquer ce mot, de l'introduire dans la série des notions précises de la mécanique. Le mot traditionnel peut rester, pourvu qu'il ne soit plus un *asylum ignorantiae* mais une devise claire d'une branche considérable de la mécanique du monde. La fin du siècle nous approche rapidement de ce but. Le mot « éther » va déjà au secours du mot « électricité » et le remplacera bientôt. La mécanique de l'éther, qui est encore loin de la netteté complète, mais qui promet un développement rapide, remplace déjà la vieille théorie des « fluides électriques » et la doctrine plus récente, mais insuffisante, « des forces électromagnétiques ».

Cette conclusion résume l'idée que Stoletow met en avant dans la dernière partie de son article : la théorie même de Maxwell est encore incomplète, et l'électromagnétisme doit être entièrement basé sur une *mécanique* de l'éther. Il termine par un souhait :⁷⁰

La mécanique de l'éther nous réserve-t-elle la solution d'autres problèmes du cosmos, comme l'espèrent déjà les plus impatients, c'est plus problématique. Mais pour l'« électricité » une nouvelle ère a commencé. Pour cette science immense le XXe siècle sera le *siècle de l'éther*.

La prédiction de Stoletow peut bien sûr prêter à sourire, l'éther ayant été relégué au rang d'objet superflu avec l'apparition de la relativité au début du XXe siècle. Mais elle témoigne d'une véritable volonté de suivre une voie purement mécaniste, dans le sillon notamment de William Thomson, auquel Stoletow fait d'ailleurs référence.⁷¹ C'est en cela que l'article qu'il nous livre est intéressant : il se place comme un article de diffusion cherchant à expliquer la théorie de Maxwell et le rôle de l'éther, mais on trouve en arrière-plan un véritable plaidoyer pour une théorie mécaniste de l'électromagnétisme. Il n'en représente pas moins un remarquable exercice de pédagogie, auquel Stoletow s'attèle avec brio. Le physicien semble avoir pris en compte la nature du journal dans lequel il publie, et ne se prive pas, dès qu'il le peut, de résumer ses propos et de détailler tous les points qui peuvent sembler ardu.

Non seulement Stoletow s'attarde sur la difficulté de définir le terme « électricité », mais il donne une explication très nette des concepts qui y sont liés, comme la charge électrique, la polarisation, le courant électrique, et l'énergie électromagnétique. À aucun moment il n'uti-

69. *Ibid.*, p. 559. Les italiques et guillemets sont de Stoletow.

70. *Ibid.*, p. 567. Les italiques et guillemets sont de Stoletow.

71. Sur les idées de William Thomson, voir chap. 2.

lise le formalisme mathématique pour décrire ces notions. Pour un ingénieur ayant lu cet article, le rôle de l'éther et ses liens avec le domaine qu'on appelle « électricité » apparaissent probablement bien plus explicites.

La loi des séries

Les formats habituels des journaux de l'époque, environ 30 à 40 pages par numéro, en deux colonnes, imposent pour les articles trop longs une publication sur plusieurs numéros successifs. Ces « séries » d'articles ne sont bien sûr pas propre à *La Lumière Électrique*, on retrouve cette habitude dans d'autres journaux, par exemple avec des séries d'Édouard Hospitalier dans *L'Électricien*. Mais la présence régulière de ces séries au sein de *La Lumière Électrique*, associée à cette volonté explicite de diffusion que nous avons mise en avant, marque véritablement une recherche de l'explication précise et détaillée, sans refuser d'étendre ses développements. Il en ressort l'impression que ces séries constituent de véritables cours par correspondance pour un lectorat qui, chaque semaine, peut se former sur un point nouveau.

Concernant les théories électromagnétiques, les exemples ne manquent pas. Nous avons déjà évoqué l'article de P.-H. Ledebøer « sur les équations générales de l'électricité » (voir p. 312), publié dans six numéros successifs. Jules Blondin n'est pas en reste, avec une première série « sur les oscillations électriques dans un conducteur cylindrique », en novembre 1893.⁷² Le sujet ne porte pas exactement sur l'enseignement d'une théorie, puisque Blondin applique les équations du champ électromagnétique (il ne les nomme pas « équations de Maxwell ») à un conducteur cylindrique en régime variable. À aucun moment il ne fait d'ailleurs référence à une théorie particulière, il utilise simplement les équations entre les grandeurs : force électrique, induction magnétique, potentiel vecteur, et expression du courant dans un conducteur ou un diélectrique, relations qu'il donne au début de l'article.⁷³

Dès le début, Blondin souligne la difficulté formelle du problème, et renvoie à l'ouvrage de J.-J. Thomson, qui consacre plus d'une centaine de pages à ce sujet.⁷⁴ Au cours de son article, Blondin fait ainsi preuve de tout une panoplie mathématique, dont l'utilisation des nombres complexes, peu répandue, et l'intégration d'équations différentielles par des séries (des fonctions de Bessel). Surtout, cette série illustre parfaitement la volonté de l'auteur d'établir un cadre rigoureux, presque scolaire, même pour traiter un sujet si difficile. Chaque partie de l'article publiée dans un nouveau numéro correspond à une partie bien définie de ce

72. Blondin 1893.

73. *Ibid.*, p. 302.

74. L'ouvrage que mentionne Blondin est *Recent researches in Electricity and Magnetism* (*Ibid.*, p 301).

« cours » qu'il souhaite faire. Ainsi, les cinq numéros successifs contiennent respectivement les parties :

- I — Équations générales
- II — Propagation des oscillations
- III — Self-induction et impédance des conducteurs
- IV — Déperdition de l'énergie sous forme de chaleur
- V — Propagation des ondes magnétiques longitudinales.

Blondin publie également une série intitulée « sur les tourbillons électrodynamiques » dans laquelle il établit les analogies entre les équations de l'électrodynamique et celle de l'hydrodynamique.⁷⁵

Mais le champion dans cette catégorie des séries d'article est incontestablement Camille Raveau. Il publie une première série d'articles en juillet 1891, titrée « Recherches récentes sur les radiations électromagnétiques ».⁷⁶ Son objectif est clair : établir un état des lieux de toutes les expériences réalisées sur la propagation des ondes électromagnétiques. Au début de cette série, il justifie cette démarche :⁷⁷

Depuis la publication des expériences de Hertz plusieurs savants se sont efforcés de les répéter et d'étudier les résultats obtenus. Les uns se sont occupés surtout de la discussion des expériences, les autres ont admis purement et simplement l'interprétation proposée par Hertz et ont cherché à reproduire avec les vibrations de grande longueur d'onde les expériences fondamentales de l'optique. Un grand nombre de ces travaux, d'ailleurs assez récents, n'ont pas encore été analysés dans ce journal ; j'ai pensé qu'il y aurait quelque utilité à les réunir en un article général dont la lecture permettra de connaître rapidement l'ensemble des méthodes nouvelles et des résultats nouveaux.

En proposant une description détaillée des dispositifs expérimentaux utilisés dans toutes les expériences sur les ondes électromagnétiques, et des résultats associés, c'est un véritable article de référence que Raveau produit. Son exposé, publié dans sept numéros successifs, est séparé en quelques grandes parties. Il débute par la production des vibrations électrique,⁷⁸

75. Blondin 1894 (c).

76. Raveau 1891 (c).

77. *Ibid.*, p. 166.

78. *Ibid.*, p. 167.

puis l'étude du résonateur et de l'exploration du champ électromagnétique (en particulier les moyens techniques pour s'affranchir des influences indirectes du dispositif, comme l'action électrostatique). Raveau détaille ensuite les résultats des diverses expériences réalisées dans l'air (réflexion et réfraction des ondes, établissement d'ondes stationnaires et longueur d'onde correspondante), puis ceux de la propagation des ondes dans les fils (il donne des résultats pour la vitesse, l'amplitude et la forme). L'article est en conséquence assez orienté vers la technique, puisque le principe même des expériences, ou la théorie associée, ne sont pas abordés. Raveau considère d'ailleurs dans son introduction que les expériences de Hertz sont connues des lecteurs à travers les différents mémoires du savant allemand qui ont été traduits et publiés dans le journal.

Une autre série, plus didactique, est publiée quelques mois plus tard. Raveau part des équations qu'il a données dans son précédent article sur la théorie de Maxwell (voir page 314), et publie un exposé assez développé sur la « Théorie électromagnétique de la lumière d'après Maxwell ». ⁷⁹ Il y aborde essentiellement la propagation des ondes dans les diélectriques, et la comparaison avec les théories de l'élasticité, qui expliquent la propagation dans les solides. On retrouve la même caractéristiques que chez Blondin, avec une section bien définie de l'article correspondant à un nouveau numéro. Dans cette série, Raveau n'utilise toujours pas la notion d'« éther » chez Maxwell : l'éther lui sert exclusivement à désigner le milieu de propagation de la lumière, dans la théorie optique. Sur ce point, il discute notamment la validité de certaines théories qui posent l'élasticité de l'éther comme indépendante de la direction et, de ce fait, la densité de l'éther qui est variable avec celle-ci. Il dit : ⁸⁰

Il faut ajouter que, pour faire une théorie véritablement satisfaisante de la lumière dans l'hypothèse actuelle de l'éther, il faudra nécessairement introduire l'action de la matière pondérable sur l'éther ; supposons que la matière pondérable participe plus ou moins complètement au moment lumineux : il pourra se faire que l'effet de cette participation soit de communiquer à l'éther un accroissement apparent d'inertie et cet accroissement pourra varier avec la direction [...]

Cette discussion est relativement éloignée de celle sur le principe de réaction pour les théories électromagnétiques, que nous développerons dans le chapitre suivant. Mais elle montre qu'une réaction mécanique de la perturbation — ici la lumière — sur le milieu de propagation est présente dans les idées des scientifiques.

⁷⁹. Raveau 1892.

⁸⁰. *Ibid.*, p. 668. Cet extrait est tiré du numéro du 31 décembre 1892. Raveau donne notamment en exemple les théories de l'éther de Joseph Boussinesq ou Émile Sarrau.

La plus grosse contribution de Raveau reste une série qu'il publie en 1893, et qui s'étale sur pas moins de neuf semaines.⁸¹ Le titre de cette série, « Sur les recherches récentes sur la théorie électromagnétique de la lumière », reflète la volonté de transmettre les travaux actuels et pas uniquement les théories acceptées depuis plus longtemps. Raveau y expose les travaux de Helmholtz, qui utilise le principe de moindre action appliqué à la théorie électromagnétique. Il aborde ainsi l'explication par le savant allemand des phénomènes comme la polarisation, la réfraction ou la dispersion. Lorsqu'il le peut, Raveau fait référence à Maxwell pour mettre en avant les équations que l'on retrouve à partir des conceptions de Helmholtz. De même, il mentionne à plusieurs reprises les résultats de Hertz, qui ont quelques différences avec ceux de Helmholtz (comme l'expression des constantes du milieu, qui diffère d'un facteur 4π entre les deux). Les différentes parties de son exposé ont pour titre : I - Comment se formule le principe de la moindre action ; II - Le principe de la moindre action et la conservation de l'énergie ; III - Comment le potentiel cinétique se déduit de l'énergie ; IV - Les propriétés générales des forces des systèmes en mouvement ; V - Le principe de la moindre action en Électrodynamique ; VI - La théorie électromagnétique de la dispersion ; VII - Remarques sur l'application du principe de la moindre action ; VIII - Quelques remarques sur la théorie de la dispersion.

Le « groupe Sorbonne », ou l'affirmation progressive d'un journal de physique

La présence des articles traitant des théories électromagnétiques va s'amplifier avec l'arrivée de la référence française dans l'étude de ces théories, Henri Poincaré. On pourrait penser que ce dernier ne joue un rôle qu'à partir des changements de 1895. Nous avons évoqué dans la première partie la mutation que subit le journal à la fin de l'année 1894, avec le départ de Cornélius Herz, la nomination d'un nouveau directeur en la personne de Ledebøer, et le changement de nom. Poincaré n'a jamais publié d'article dans *La Lumière Électrique*, et en publie plusieurs dès les premiers volumes de *L'Éclairage Électrique*. Mais « l'empreinte Poincaré » est déjà présente depuis longtemps sur le journal. Poincaré donne ses premiers cours sur l'électromagnétisme à la Sorbonne en 1888. Reprenons les auteurs des publications sur l'électromagnétisme parues dans le journal *La lumière Électrique* : à partir de 1889, Pierre-Hugo Ledebøer, préparateur à la Sorbonne ; en 1891, Camille Raveau, qui vient de suivre les cours de Poincaré et qui officie à la Faculté des sciences de Paris entre octobre 1891 et mars 1902 ;⁸² cette même année, Bernard Brunhes puis Jules Blondin, qui ont tous deux rédigé

81. Raveau 1893. Les numéros dans lesquels apparaissent ces articles ne sont pas forcément suivis.

82. Source : base Léonore, dossier 19800035/1234/42328.

des cours de Poincaré.

Au sein de *La Lumière Électrique*, un réseau se forme peu à peu à partir de 1889. Tous les articles traitant des théories électromagnétiques sont rédigés par un groupe de physiciens tous en lien avec la Sorbonne, qui s'organise autour d'Henri Poincaré. Ce « groupe Sorbonne » est à l'origine de la mutation que subit peu à peu le journal, bien avant son changement de nom en 1894. Il est évident qu'on ne peut pas attribuer à ce groupe les ennuis politiques et la fin prématurée du directeur du journal Cornélius Herz. Mais cette chute n'a fait que mettre sur le devant de la scène un mouvement qui officiait depuis plusieurs années. En ce sens, le passage de *La Lumière Électrique* à *L'Éclairage Électrique* ne constitue pas un commencement, mais une accélération d'un processus qui aurait probablement perduré, ou qui, au vu de l'ascension de Poincaré, se serait au moins accentué.⁸³

Un autre exemple semble refléter l'influence croissante de Poincaré au sein de *La Lumière Électrique* : en avril 1894, Alfred Liénard, jeune ingénieur passé — comme Poincaré — par Polytechnique puis l'École des Mines de Paris, publie un article très théorique sur les pressions à l'intérieur des corps polarisés.⁸⁴ À ce moment, Liénard est en poste à l'École des Mines de Saint-Étienne, loin de Paris et des cercles académiques. La publication de cet article dans *La Lumière Électrique* est surprenante, non par le sujet de l'article, qui traite de phénomènes électriques, mais par son niveau très théorique et qui s'apparente aux contributions des auteurs précédents. Il est raisonnable de penser que Poincaré, par son action au sein du journal, représente pour ses condisciples polytechniciens éloignés de la capitale une possibilité de publication, même pour des articles théoriques (voir chap. 12).

À partir de l'arrivée de *L'Éclairage Électrique*, les traits caractéristiques du journal que nous avons développés plus haut sont encore plus flagrants. Dès les premiers volumes, Blondin publie une série d'articles « Sur la propagation des perturbations électriques et magnétiques ».⁸⁵ Alfred Liénard publie en 1898 plusieurs articles visant à expliquer la théorie de Lorentz et celle de Larmor (voir 4.2). Nous détaillerons ces articles dans le chapitre sur Liénard. Poincaré lui-même publie plusieurs articles qui résument l'ensemble des théories électromagnétiques. Le titre de la série, « À propos de la théorie de M. Larmor », peu explicite, est en fait un prétexte pour le mathématicien-physicien pour développer toutes les idées que lui a « suggérées » la lecture du mémoire de Larmor.⁸⁶

83. L'expression « groupe Sorbonne » est donnée en référence au « groupe des Annales » que Michel Atten met en avant dans la construction de la communauté des télégraphistes qui se forme autour du journal des *Annales télégraphiques*. Dans notre cas, le groupe se forme en dehors du journal.

84. Liénard 1894.

85. Blondin 1894 (d).

86. Poincaré 1895 (vol. III, p. 5). Le mémoire de Larmor en question est le mémoire *A Dynamical Theory*

Ces articles de Poincaré ne peuvent pas réellement être considérés comme des articles de diffusion, car ils recèlent de nombreuses vues personnelles, comme l’auteur l’indique dans ses premières lignes. Il est l’exemple d’une nouvelle tendance qui se développe au sein du journal, avec l’apparition de publications théoriques qui ne sont pas des articles visant à expliquer une théorie déjà existante, mais bien à développer des idées personnelles. Ces nouvelles publications, qui sont à considérer comme des articles de recherche et non plus de diffusion, deviennent de plus en plus nombreuses. L’article publié en 1898 par Alfred Liénard (que nous détaillerons également dans un chapitre suivant), dans lequel l’auteur effectue pour la première fois les calculs des champs électriques et magnétiques produits par une charge ponctuelle en mouvement à vitesse quelconque, en est un parfait exemple.⁸⁷

10.3 Le journal *The Electrician* : un modèle outre-manche ?

Si *La Lumière Électrique* n’a pas d’équivalent en France, elle est très proche de l’un de ses aînés britanniques. Le journal *The Electrician*, est créé en 1862, avec pour visée d’être un journal hebdomadaire centré sur la télégraphie et l’électricité. Les premiers numéros sont publiés par Thomas Piper. L’édition du journal s’arrête après quelques années, et le journal est repris en 1878, les propriétaires et le nouvel éditeur, James Gray, changeant la ligne éditoriale pour en faire un journal hebdomadaire abordant aussi bien les thèmes de l’électricité et de l’industrie que des sujets plus théoriques comme l’électromagnétisme.⁸⁸

Un journal plus ouvert

Dès ses débuts, le journal *The Electrician* affiche une large volonté d’ouverture envers tout type de publication traitant de l’électricité. On y trouve plusieurs publications abordant l’électromagnétisme théorique, et notamment — de façon peu surprenante — beaucoup plus de publications traitant de la théorie de Maxwell que dans le journal français. C’est par exemple le cas de des conférences, reprises de la *Royal Society* ou de la *British Association*, au cours desquelles les grands noms de la physique britannique comme William Thomson ou George Stokes évoquent les conceptions de l’éther. Dès 1879, on trouve des conférences sur l’induction

of the electric and luminiferous Medium que nous évoquons plus haut.

87. Liénard 1898 (b).

88. Voir introduction Nio 2017.

électrique faites par James E.H. Gordon, assistant secrétaire à la *British Association*, devant la *Royal Institution*. Ces conférences, entièrement reprises dans le journal, accordent une place importante aux idées de Faraday et à la théorie de Maxwell.⁸⁹

De même que pour le journal français, certains auteurs affichent la volonté d'expliquer aux ingénieurs la théorie de Maxwell. C'est le cas d'un article de Henry D. Wilkinson, ingénieur spécialisé dans la transmission par câbles sous-marins et formé, comme Oliver Heaviside, au sein d'une compagnie de télégraphie. Enseignant au sein de la *School of Electrical Engineering*, Wilkinson rédige notamment un ouvrage *On submarine cable laying and repairing and electric lifts*. Son article publié dans *The Electrician* en 1887 est intitulé « *Maxwell's Theory of Electricity* ». Wilkinson, lui-même ingénieur, choisit d'exposer avant tout les notions en lien avec le modèle mécanique de Maxwell, qu'il pense plus simple à assimiler. Il justifie sa démarche d'expliquer aux ingénieurs les travaux de Maxwell, et leur importance dans le développement des outils que ceux-ci utilisent, dans les termes suivants :⁹⁰

C'est peut-être un motif de regret que le merveilleux concept mécanique d'action électrique, que nous devons au génie de Clerk-Maxwell, ne soit à présent que peu entré dans le mode de pensée des ingénieurs électriciens. Il est vrai que le *Treatise on Electricity* ne peut être lu avec profit, sauf par ceux qui ont des facilités avec les mathématiques poussées ; mais il n'y a pas de raison pour que le mécanisme du système que Maxwell a conçu comme capable de produire des effets analogues à l'électricité ne puisse pas devenir familier aux électriciens. Que ce système représente ou non les véritables mécanismes naturels, nous ne doutons pas qu'une meilleure connaissance de ces notions parmi les hommes de pratique ne soit bénéfique à l'avancée des sciences appliquées.

Sur l'objectif et sur l'agencement, cet article est très proche de celui de Séligmann-Lui, publié deux ans auparavant dans le *Bulletin de la SIE*, dont le titre est « la théorie de l'électricité de Maxwell » (voir 9.3 p. 283). Remarquons ici le caractère particulièrement novateur de l'auteur français, puisque même en Grande-Bretagne ce type de démarche au sein d'une revue pour ingénieurs n'avait pas été entreprise.

L'éther au premier plan

89. Voir : *The Electrician*, vol. II (1878-1879), numéro des 16, 23, 30 janvier et 6 février. Les conférences ont été publiées : Gordon 1881.

90. Wilkinson 1887, p. 311.

Au sein du journal anglais, les théories électromagnétiques apparaissent de façon régulière. Le nombre de publications est à peu près équivalent à celui du journal *La lumière Électrique*, avec une large préférence pour les théories des physiciens britanniques. Par rapport au journal français, il y a surtout une différence majeure : la question de l'éther revient régulièrement, et occupe une place prédominante. Les discours d'ouvertures, qui englobent souvent les grands questionnements de la physique, constituent des occasions régulières de l'aborder. Et ces *Presidential Addresses* s'adressent parfois directement à un public d'ingénieurs, comme le discours de W. Thomson prononcé devant l'*Institution of electrical engineers* (anciennement *Society of electrical engineers*), le jeudi 17 janvier 1889. Ce discours, intitulé « *Ether, Electricity and Ponderable Matter* » a été repris dans *The Electrician*.⁹¹ Thomson y parle de l'importance croissante donnée à la nécessité de comprendre les phénomènes sous-jacents à l'électricité, dans un passage qui peut rappeler son désir « d'aller plus loin » que les simples analogies mécaniques (voir 2.3 p. 61) :⁹²

La demande pour quelque chose ressemblant à une explication mécanique des phénomènes électriques n'est pas nouvelle, mais elle gagne en intensité chaque année. Les comptes rendus des récents colloques de la *British Association* — et particulièrement celui du dernier colloque de la *British Association* [le colloque de Bath] — illustrent le désir croissant de connaître le fond des choses ; d'avoir quelque connaissance des relations internes en lien avec les merveilleuses manifestations de force et d'énergie qui sont à l'œuvre dans l'action d'un aimant, dans le travail même d'une machine électrique, et dans les phénomènes électromagnétiques.

Avec son discours, Thomson aborde les différents modèles d'éther que nous avons détaillés dans la première partie, avec l'analogie fluide de Maxwell, le modèle de solide élastique, ainsi qu'un modèle d'éther rotationnel. Le discours est accompagné d'un commentaire de l'éditeur, qui insiste sur la nécessité pour les ingénieurs de comprendre ce qu'est l'éther, bien qu'il soit assez remarquable à son avis qu'ils n'en aient pas besoin dans leurs travaux :⁹³

L'ingénierie électrique, sommes nous forcés d'en convenir, n'est pas confinée à l'électricité et la matière pondérable. il y a aussi une entité mystérieuse sans laquelle (bien qu'on puisse se satisfaire de l'ignorer dans notre travail quotidien) aucune étape ne peut être franchie vers une meilleure compréhension de la nature intime

91. *The Elec.*, vol. XXII, p. 305-8. Également publié dans Thomson 1882, vol. III, p. 484, dont les citations sont reprises.

92. *Ibid.*

93. *The Elec.* 1889.

des phénomènes auxquels l'électricien est confronté. C'est sans aucun doute, d'un côté, un légitime sujet de contentement que la théorie de l'électricité appliquée puisse reposer sur des bases pratiques négligeant virtuellement l'éther, et penser que l'électricité puisse être uniquement de la matière pondérable ; mais d'un autre côté, c'est sûrement une chose souhaitable que nos idées soient maintenant tournées vers ce milieu mystérieux et occulte dont nous connaissons en partie les propriétés, mais dont le mécanisme et la structure ont fait échouer les plus brillants esprits.

L'omniprésence de l'éther dans les théories anglaises, de même que la multiplication des modèles pour expliquer les phénomènes électriques ou lumineux, entraîne parfois l'incompréhension des non-initiés. Et les correspondances que l'éditeur publie régulièrement sont une source inestimable pour en apprécier l'étendue. Dans une lettre intitulée simplement « *The Ether* », publiée dans le numéro du 20 novembre 1891, l'auteur évoque la théorie de Thomson sur l'éther gyrostatique, les théories de Lodge, la coexistence de différents modèles d'éther qui ne peuvent pas tous être corrects, et finit par un souhait :⁹⁴

Je demande maintenant, de façon tout à fait sérieuse, s'il n'est pas temps qu'une autorité se prononce sur ce même éther [...] À présent, moi et sans doute beaucoup d'autres ingénieurs souhaiterions aussi en avoir une idée claire, et nous nous tournons naturellement vers les éminents physiciens pour nous éclairer et nous mener. Lequel d'entre eux nous aidera ?

Cette lettre, si elle n'engage que son auteur et non l'ensemble de la catégorie des ingénieurs, montre que l'assimilation du concept de l'éther, ainsi que les notions afférentes (propriétés de solidité/élasticité, énergie transmise...) échappent à une partie du lectorat, et que ces raisonnements sont complexes à suivre pour des gens n'ayant pas de formation en physique pure.

Au vu de la lettre précédente, le principal problème reste la coexistence de plusieurs modèles d'éther, où il est parfois difficile de cerner les différences et leur intérêt. Cette situation illustre parfaitement le discours de William Preece (voir 9.2) lorsque celui-ci avance qu'« il est difficile de trouver deux physiciens qui soient absolument d'accord entre eux ». La prolifération de différents modèles a tendance à perdre ces non-initiés, et peut même valoir de sévères critiques au monde académique de la physique. Dans une note éditoriale du 22 septembre 1893, cette propension à la création de modèles d'éther est remise en cause ironiquement :⁹⁵

94. *The Elec.* 1891.

95. *The Elec.* 1893. La fin du passage original est : *The British Association has really done something*

La section A a donné naissance à bien des éthers. Il serait peut-être plus aisé de les nommer d'après leurs lieux de naissances. Ainsi nous aurions l'éther « gyrostatique » de Montréal, l'éther « turbulent-vortex » de Manchester, et le fameux éther aux « doubles-sphères-concentriques-isolées-ne-craignant-pas-une-scie-circulaire » qu'il serait plus simple d'appeler l'éther de Nottingham. La *British Association* a fait beaucoup en permettant le bourgeonnement de ces publications annuelles résistantes, qui ne font que rarement éclore des fleurs dignes d'orner les travaux d'une société savante sérieuse.

Cette critique, pour le moins directe, vise particulièrement les séances annuelles de la *British Association*. Une note précédente, probablement du même auteur, attaque directement les physiciens prenant part à ces manifestations.⁹⁶

Le jardin de Heaviside

Il nous semble impossible de parler du journal *The Electrician* et des théories électromagnétiques sans évoquer la contribution majeure d'Oliver Heaviside (voir 3.4). Maxwellien de la première heure, télégraphiste dans l'âme, Heaviside publie presque tous ses articles dans cette revue. Ces publications sont à la fois des séries qui s'étendent parfois sur plusieurs mois, et des articles de recherche d'un niveau particulièrement élevé. Il est, parmi tous les auteurs qui ont publié des articles dans le journal *The Electrician*, sans conteste le plus assidu.⁹⁷

À partir de 1882, Heaviside publie de façon presque continue dans *The Electrician*. Si son premier article « *The Earth as a return conductor* » est relativement court, le scientifique s'illustre par la publication de séries entières comportant parfois plus d'une vingtaine d'articles, séries qui proposent un caractère presque pédagogique. Cette démarche d'explication est bien illustrée par sa première grande contribution, une série d'articles intitulée « *The relations between magnetic force and electric current* » publiée à partir du 18 novembre 1882.⁹⁸

in affording opportunities for the flowering of these hardy annuals, which rarely put out blossoms worthy of adorning the proceedings of a serious scientific society. Les deux premiers éthers font référence aux travaux de Thomson. L'éther de Nottingham fait référence à l'exposé de Lodge au colloque de la *British Association* de 1893 à Nottingham, lors de laquelle Lodge a présenté ses expériences de 1891. La question lui a été posée de l'effet d'un disque rapide en rotation comme pourrait l'être une scie circulaire (sur ce point voir *Nature* 1893).

96. Pour une étude plus développée de ces publications voir : Nio 2017, pp. 71-94.

97. Pour certains articles l'étude a été faite à partir des deux volumes des *Electrical Papers* (abrév. *EP I* ou *II* en note). La date mentionnée est celle de publication dans le journal.

98. Heaviside 1892, vol. I, p. 190 et 195 resp.

Après avoir introduit des notions mathématiques (sections I et II), en particulier sur le formalisme vectoriel avec l'introduction de l'opérateur « rotationnel » (*curl*) et des potentiels scalaires, Heaviside aborde les théorèmes en électricité dans les sections III à VI. Dans cette série, son propos reste assez général et il ne mentionne à aucun moment l'éther, mais préfère parler de « milieu conducteur ». ⁹⁹ Il y fait régulièrement référence à Maxwell, à la fois pour ses travaux sur le formalisme vectoriel et pour ses représentations des lignes de force pour un fluide incompressible.

Cette série peut être vue comme une introduction presque « préparatoire » à la théorie de Maxwell, théorie qui nécessite des notions avancées de mathématiques ainsi que certaines conceptions particulières (fluide incompressible, lignes de force, ...). La deuxième série remarquable porte sur « *The induction of current in cores* », ¹⁰⁰ publiée à partir de mai 1884. On retrouve les mêmes caractéristiques que dans la précédente série, Heaviside mentionnant parfois la « théorie de Maxwell » sans parler de l'éther, ni même de milieu intermédiaire. ¹⁰¹

Les travaux de Heaviside sur l'éther sont beaucoup plus visibles dans un article publié dans le numéro du 23 janvier 1891 intitulé « *The rotationnal ether in its application to electro-magnetism* ». Cet article illustre parfaitement les idées et les méthodes que Heaviside a reprises de Maxwell. Bien qu'il s'en éloigne en préférant utiliser les champs \mathbf{E} et \mathbf{H} plutôt que les potentiels, qu'il juge « obscurs », Heaviside reprend les relations que Maxwell avait démontrées en considérant \mathbf{E} comme une force et \mathbf{H} comme une vitesse, et mentionne les travaux de Lodge pour rappeler que cette analogie est courante. Il rappelle également à la fin de son article que ce n'est « qu'une analogie en vertu de la similitude des relations ». ¹⁰²

Mais la série d'articles la plus importante de Heaviside reste probablement celle intitulée « *Electro-magnetic induction and its propagation* », publiée à partir du 3 janvier 1885. Les points concernant l'éther sont surtout abordés dans la première partie de cette série. Elle débute par un résumé particulièrement clair de la théorie de Maxwell : ¹⁰³

99. *Ibid.*, p. 216.

100. Heaviside 1892, vol. I, p. 353.

101. Par exemple *Ibid.*, p. 374 ou 395.

102. Heaviside 1891.

103. Heaviside 1892, vol. I, p. 429-560.

Dans le schéma électromagnétique de Maxwell, on reconnaît trois propriétés distinctes d'un corps en lien avec les forces électrique et magnétique, à savoir la conductivité, la capacité électrostatique, et la perméabilité magnétique. Le corps peut subir un courant de conduction, le déplacement électrique, et l'induction magnétique. Ces trois phénomènes peuvent, et en général c'est le cas, coexister en tout point. D'un point de vue quantitatif, ce sont toutes des grandeurs vectorielles ayant des directions et des intensités données.

Heaviside est également explicite sur le rôle de l'éther comme milieu de propagation des perturbations magnétiques. Il ne cherche pas à connaître la nature réelle de l'éther, mais le considère comme un diélectrique parfait :

Là où il n'y a pas de matière, au sens ordinaire du terme, il n'y a pas de dissipation d'énergie ; et l'éther, quoiqu'il puisse être, est parfaitement conservatif et non-dissipatif d'un point de vue dynamique. [...] Mais l'éther ne peut être ce conducteur parfait compatible avec la propagation des perturbations magnétiques, puisque rien ne peut se propager dans un conducteur parfait. Supposons donc qu'elles se propagent dans l'éther pur (espace dont toute la « matière » est ôtée) sans perte d'énergie dans le milieu, et il s'en suit que l'éther est l'isolant parfait.

Il reconnaît même que la nature de l'éther est difficilement accessible, mais que celui-ci reste un élément indispensable à la physique :

L'Éther est une chose merveilleuse. Elle peut n'exister que dans l'imagination des sages, être inventée et pourvue de propriétés pour satisfaire leurs hypothèses ; mais on ne peut s'en passer.

Dans cette série Heaviside met vraiment l'éther au centre de ses raisonnements, notamment pour expliquer la propagation de l'énergie et le comportements des diélectriques (« Le déplacement électrique est par nature un phénomène de l'éther »).¹⁰⁴ De plus, il ne se contente pas de considérer que l'éther est une notion connue de tous, il donne les propriétés de l'éther en tant que milieu de propagation : c'est un diélectrique qui remplit tout l'espace (« Entre les molécules nous avons le milieu électrique, l'éther »).¹⁰⁵

Un bref survol de ce journal britannique permet de mettre en avant plusieurs différences majeures avec le journal français, bien que les deux revues aient dans l'ensemble un profil

104. *Ibid.* p. 478.

105. *Ibid.*, p. 435.

très similaire. Le mouvement majeur de diffusion autour des théories électromagnétiques, avec cette volonté de résumer les différentes théories, qui se crée dans *La Lumière Électrique* n'existe pas dans *The Electrician*. Les principaux articles sur ce thème sont dus à un seul homme, Heaviside, et constituent en pratique des articles de recherche, malgré un caractère pédagogique évident. La question de l'éther est beaucoup plus présente dans le journal anglais, mais survient essentiellement à travers les comptes rendus, et surtout les discours, très utilisés. Mais cette présence de l'éther, et les nombreuses hypothèses qui en ressortent, suscitent de nombreuses incompréhensions auprès du lectorat, qui montre des difficultés particulières à comprendre la multiplication des modèles d'éther.

Conclusion

Le journal *La Lumière Électrique* subit une profonde mutation entre ses premières années et la fin du siècle. Mutation sur la forme, avec un changement de nom et de direction scientifique, mais également sur le fond, avec une orientation beaucoup plus théorique. La comparaison des tables des matières en 1879 et 1899 reflète bien ce changement. Pour le premier numéro en 1879, les articles portant sur l'étude des phénomènes électriques ou sur les lois de l'électricité ne représentent qu'une faible partie d'une table des matières largement occupée par les applications — éclairage électrique, chemins de fer, transport d'électricité, piles, ... —, les comptes rendus d'académies et les informations sur les compagnies électriques. Ces deux dernières catégories sont reléguées dans le supplément à la fin des années 1890, alors que le corps du journal traite à la fois des applications et de sujets plus théoriques : théorie des conducteurs, des diélectriques, oscillations hertziennes, rayons Röntgen, etc.

Cette transformation du journal ne s'est pas faite par à-coups, mais par l'influence grandissante de certains auteurs. En manifestant une vraie volonté d'explication envers un lectorat non-spécialiste du domaine, ils lancent un mouvement organisé qui ne sera pas affecté par la chute du premier propriétaire Cornélius Herz. Dès 1889, un lecteur français peut se tourner vers *La Lumière Électrique* pour se former sur les théories les plus récentes. La présence de l'éther est plus nuancée. Dans les premières années du journal, on retrouve — comme dans d'autres journaux — un éther qui serait connu des lecteurs comme le milieu de propagation de la lumière, auquel on n'attribue pas de définition concrète. Dans les articles traitant des théories électromagnétiques, l'éther est parfois passé sous silence (pour Maxwell) ou au

contraire au centre du raisonnement (pour Larmor).

À titre de comparaison, un journal comme *The Electrician*, journal anglais dédié à l'électricité et s'adressant principalement à des ingénieurs, propose dès ses débuts plusieurs articles ou publications traitant de points théoriques mais ne semble pas offrir de base solide au lectorat. Les nombreux discours ou articles traitant de l'éther égarent les lecteurs non-spécialistes, qui manifestent parfois leur incompréhension par rapport aux informations contradictoires qu'ils reçoivent.

Wir sind gewohnt dass die
Menschen verhöhnén was sie
nicht verstehen.¹

Goethe

Chapitre 11

Poincaré et l'éther dans les théories électromagnétiques

Henri Poincaré, mathématicien et physicien, représente à la fin du XIXe siècle une figure déjà incontournable de l'électromagnétisme. Professeur à la Sorbonne, Poincaré est notamment le premier à faire un cours entièrement dédié à la théorie de Maxwell, en 1888. Ses cours, qui jouissent d'une immense popularité, servent de vecteur de diffusion auprès du lectorat pouvant les comprendre. D'autre part, Poincaré vise un public encore plus large, avec la rédaction de plusieurs livres de vulgarisation. Nous avons vu dans le chapitre précédent le rôle important que jouait Poincaré dans la transformation du journal *La Lumière Électrique*, en mettant en avant ses anciens élèves. Il est ainsi un acteur incontournable dans le milieu des ingénieurs par ce biais là (il est lui-même ancien élève de l'X) et ses cours sont diffusés y compris auprès d'un public d'ingénieurs et de techniciens ; il est donc nécessaire d'examiner le contenu de ses cours donnés à la Sorbonne.

Ce chapitre n'a pas pour objectif de fournir une description exhaustive des travaux de Poincaré, tâche qui serait colossale et hors de notre propos (dans l'introduction de son ouvrage, Scott Walter nous signale l'étendue des travaux de Poincaré : « Entre 1886 et 1901 il publie dix-sept volumes et 80 articles de physique mathématique »).¹ Le but est de donner un résumé des idées principales que Poincaré transmet sur l'éther et les théories électromagnétiques, à travers certains cours et ouvrages qui ont été publiés. Ses principales contributions sont présentées dans la première partie. La deuxième partie est centrée sur la théorie de Maxwell, expliquée à travers les cours, pour un public averti, mais également par les ouvrages

1. On se moque toujours de ce que l'on ne comprend pas.

1. Voir Walter 2007, p. xii.

de vulgarisation. Enfin, la dernière partie traite des théories de Hertz et Lorentz, qui font notamment l'objet d'un cours en 1899. Dans ces théories, Poincaré aborde en particulier la question du principe de réaction, sur laquelle il revient dans la rédaction d'un mémoire à l'occasion du Jubilé pour Lorentz en 1900. Si ce mémoire représente un travail de recherche et ne s'adresse pas à un large public, Poincaré revient sur un résultat développé dans le journal *L'Éclairage Électrique* par Alfred Liénard, auquel nous consacrerons le chapitre suivant.

11.1 Une figure de l'enseignement

Henri Poincaré (1854-1912) débute en tant qu'élève de Polytechnique (X 1873). Major de sa promotion au concours d'entrée, il est classé deuxième à sa sortie et intègre les Mines de Paris en 1875.² Il reviendra à Polytechnique à partir de 1883 en tant que répétiteur d'analyse, mais c'est en tant que professeur à la Sorbonne que Poincaré acquiert sa renommée. Tout d'abord nommé maître de conférences en octobre 1881,³ il occupe plusieurs postes de suppléant, pour la chaire de « Calcul différentiel et intégral », puis celle de « Mécanique physique et expérimentale ». Il devient finalement professeur titulaire de la chaire de « Physique mathématique et calcul des probabilités » en août 1886.⁴ Il troquera cette chaire contre celle d'« Astronomie mathématique et mécanique céleste » en 1896. Pendant cette période, Poincaré donne un cours par semestre sur un sujet de son choix. La plupart de ces cours sont ensuite publiés : entre 1886 et 1896, sur les 20 cours professés, 12 sont publiés (voir tableau 11.1).

Dans les cours d'électromagnétisme, Poincaré s'attache à traiter des théories récentes, comme Maxwell (cours donné en 1888), Hertz (1890 pour les expériences, 1899 pour la théorie) ou Lorentz (1899). Les cours qui sont publiés constituent alors des ouvrages destinés à devenir des ouvrages de référence sur ces théories nouvelles, et permettent une diffusion plus large que l'auditoire de la Sorbonne. Cet auditoire est d'ailleurs relativement restreint : pour le cours de 1889, on dénombre par exemple 25 auditeurs, dont Camille Raveau et Bernard Brunhes.⁵ Précisons ici que certains ingénieurs suivaient les cours de Poincaré : c'est par exemple le cas

2. Voir : Rollet 2017.

3. Pour les éléments biographiques voir également : Atten 1992, p. 229. Atten souligne que la fonction de maître de conférence vient alors d'être créée.

4. Poincaré, 31 ans, est officiellement trop jeune pour postuler à un tel poste ; il bénéficie de certaines relations et de circonstances favorables, comme la préférence de Lippmann, précédent titulaire du poste, pour la chaire de Physique recherche. Voir Atten 1992, p. 231.

5. Liste tirée d'une lettre de Camille Raveau à Henri Poincaré, adressant les félicitations pour l'obtention d'un prix (le prix du roi de Suède), de la part des « auditeurs de [son] cours ». Voir Walter 2007, p. 317-8.

Année	Semestre	Énoncé du cours	Publication
1885-86	1er S.	Cinématique et mécanique	autographiée 1886
	2e S.	Potentiel et mécanique des fluides	autographiée 1886
1886-87	1er S.	Théorie du potentiel	
	2e S.	Théorie du potentiel et propagation de la chaleur	
1887-88	1er S.	Quelques questions d'optique	TML1. 1889
	2e S.	Électromagnétisme	E-O1. 1890
1888-89	1er S.	Thermodynamique	1892
	2e S.	Capillarité	1895
1889-90	1er S.	Étude des méthodes mathématiques pour la physique (problème des trois corps)	E-O 2. 1891
	2e S.	De l'électrodynamique	
1890-91	1er S.	De l'électrostatique	1892
	2e S.	Théorie de l'élasticité	
1891-92	1er S.	Études de différentes questions d'optique	TML 2. 1892
	2e S.	Théorie des Tourbillons	1893
1892-93	1er S.	Oscillations électriques	1894
	2e S.	Principes fondamentaux de la théorie cinétique des gaz	
1893-94	1er S.	Théorie de la chaleur	1895
	2e S.	Calcul des probabilités	1896
1894-95	1er S.	Théorie du potentiel Newtonien	1899
	2e S.	De l'électrostatique	
1895-96	1er S.	Élasticité	
	2e S.	Questions d'optique	
1896-97	1er S.	Sur le problème des trois corps et les perturbations planétaires	
1897-98	1er S.	Perturbations planétaires et développement de la fonction perturbatrice	
1898-99	1er S.	Sur les nouvelles électrodynamiques - la théorie de Lorentz	EO 1901
	2e S.	Figures des corps célestes	
1899-00	1er S.	Théorie de la Lune	
1900-01	1er S.	Figures d'équilibre d'une masse fluide	1902
1901-02	1er S.	Théorie des marées	
1902-03	1er S.	Perturbations planétaires	
1903-04	1er S.	Perturbations planétaires	
1904-05	1er S.	?	
1905-06	1er S.	?	
1906-07	1er S.	Limites de la loi de Newton	
1907-08	1er S.	Limites de la loi de Newton	

FIGURE 11.1 – Tableau récapitulatif des cours donnés par Poincaré à la Sorbonne (tiré de Atten 1992 p 234). Soulignons que certains cours ont été publiés avec un intitulé différent. Les lignes pointillées marquent le changement de chaire de Poincaré.

d'Henri Vergne, élève (promotion 1901) puis professeur de physique à l'École Centrale, qui sera l'auditeur de Poincaré pendant plusieurs années. Vergne rédigera les leçons de Poincaré donnée pendant l'année 1910-1911, et publiées sous le nom de *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*.⁶ Le rayonnement des travaux de Poincaré va d'ailleurs au-delà des frontières françaises. Dans son ouvrage *Physik des Aethers* (1894) qui est le premier livre d'un auteur allemand sur l'enseignement de la théorie de Maxwell, le physicien Paul Drude reconnaît suivre la voie ouverte par Poincaré dans son cours de 1888. Les premiers cours de Poincaré sur les théories électromagnétiques sont traduits par des assistants de Helmholtz à Berlin et publiés en Allemagne un an après leur publication en France, soit en 1891 et 1892 pour les volumes 1 et 2 respectivement.⁷

Nous présentons ici les ouvrages que nous allons utiliser dans cette étude.⁸ La référence principale, tant par son contenu que par le rayonnement qu'elle aura (en France et en Allemagne) est tirée de certains cours de la Sorbonne : il s'agit du livre *Électricité et Optique* (abrégé. EO), pour lequel nous allons considérer trois volumes distincts. Les deux premiers volumes (que nous désignerons par EO 1 et 2) datent du début des années 1890. Le premier volume sur « Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière » est publié en 1890 et reprend le cours « Électromagnétisme » du second semestre de l'année 1887-1888.⁹ Le second volume, « Les théories de Helmholtz et les expériences de Hertz » est publié en 1891 ; il porte sur le cours « De l'électrodynamique » du second semestre 1889-90. Poincaré y traite de façon plus détaillée les expériences de Hertz, qu'il ne fait que mentionner dans son livre de 1890, ces expériences étant alors très récentes (Hertz n'a à ce moment là pas encore publié son propre ouvrage). Poincaré donnera d'ailleurs en 1892-93 un cours dédié entièrement aux « Oscillations électriques », publié en 1894 sous le même nom, que nous ne commenterons pas ici.

En 1901, une deuxième édition d'*Électricité et Optique* est publiée, qui se base sur les cours de 1888 et 1890 déjà mentionnés, mais surtout sur le cours du premier semestre 1898-1899 (cours qui s'intitule « Sur les nouvelles théories électrodynamiques - la théorie de Lorentz »).

6. Voir : Poincaré 1911. Sur la contribution de Vergne voir également : Poincaré 1953 sur les limites de la loi de Newton. Cet article a été rédigé d'après les notes de Vergne. Poincaré teste notamment ce qu'il nomme la « théorie de Lorentz » de 1904 (voir la conférence donnée lors de l'exposition universelle de Saint-Louis en 1904 : Poincaré 1904 (c)) sur l'avance du périhélie de Mercure et montre qu'elle n'explique que 7 des 42" d'arc observées.

7. Ces ouvrages font l'objet de notes de lectures dans la revue *Elektrotechnischer Zeitschrift* (l'équivalent en allemand de *La Lumière Électrique* en France ou *The Electrician* en Grande-Bretagne) qui en recommande vivement la lecture à "tout physicien". *EZ* 1891.

8. Voir la bibliographie pour les références complètes des ouvrages.

9. Dans l'édition de 1890 de ce volume il y a une erreur sur la première page, qui date le cours en question de l'année 1888-89. Cette année-là sera donné un cours de « Capillarité », publié en 1895.

Soulignons ici le fait que Poincaré, bien qu'il occupe à ce moment-là la chaire d'Astronomie mathématique, reste très impliqué dans l'enseignement de l'électromagnétisme. Nous considérerons cette deuxième édition comme un volume à part entière d'*Électricité et Optique* (abrég. EO 1901), car près de la moitié de cette réédition (282 pages sur 627) est consacrée aux théories de Hertz, de Lorentz, et de Larmor, construites après 1890 et qui n'apparaissent évidemment pas dans les précédents volumes. Outre les cours à la Sorbonne, Poincaré dispense quelques cours à l'École Nationale Supérieure des Postes et Télégraphes (ex-EST) en 1904, 1906 et 1908, en particulier un *Cours d'Électricité théorique* en 1904.¹⁰

Concernant ces cours à l'École des Postes et Télégraphes, une étude sur le rôle de l'éther est pour le moins rapide : sur tout son cours de 1904 (une cinquantaine de pages), Poincaré ne fait à aucun moment référence à l'éther, ni ne mentionne de théorie électromagnétique en particulier. Dans son paragraphe sur la théorie de la propagation, il se contente de rappeler « les équations du champ électromagnétique » et de définir un potentiel vectoriel $\mathbf{\Pi}$ (tel que la force magnétique soit $\mathbf{H} = \nabla \wedge \mathbf{\Pi}$), potentiel qu'il utilise pour l'équation de propagation. Le reste du cours, assez mathématique, traite de la résolution de l'équation et de l'étude de certains cas particuliers (réflexion multiple, cas du récepteur relié à la Terre, lignes fermées, ...).¹¹

Parmi les nombreux ouvrages qu'il écrit, Poincaré publie le livre *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes* en 1899 dans une collection dédiée à certains thèmes scientifiques, la collection *Scientia* (lancée par l'éditeur Carré & Naud, avant d'être reprise par Gauthiers-Villars). Dans son manifeste, l'éditeur présente cette collection comme un « Exposé et développement des questions scientifiques à l'ordre du jour », et il justifie le lancement de cette collection de la façon suivante :¹²

À côté des revues périodiques spéciales, enregistrant au jour le jour le progrès de la Science, il nous a semblé qu'il y avait place pour une nouvelle forme de publication, destinée à mettre en évidence, par un exposé philosophique et documenté des découvertes récentes, les idées générales directrices et les variations de l'évolution scientifique. À l'heure actuelle, il n'est plus possible au savant de se spécialiser ; il lui faut connaître l'extension graduellement croissante des domaines voisins : mathématiciens et physiciens, chimistes et biologistes ont des intérêts de plus en

10. Sur ce point voir : Ginoux 2011.

11. Poincaré 1904 (b), p. 3-4.

12. Poincaré 1904 (a), supplément.

plus liés. C'est pour répondre à cette nécessité que, dans une série de monographies, nous nous proposons de mettre au point les questions particulières, nous efforçant de montrer le rôle actuel et futur de telle ou telle acquisition, l'équilibre qu'elle détruit ou établit, la déviation qu'elle imprime, les horizons qu'elle ouvre, la somme de progrès qu'elle représente.

Le lectorat n'est pas clairement défini : l'approche philosophique ne semble pas adaptée aux ingénieurs et aux spécialistes du sujet, qui auraient probablement une préférence pour les revues périodiques spéciales en question. Néanmoins, l'éditeur semble s'adresser à des scientifiques de métier lorsqu'il évoque l'interdisciplinarité de la science : il est peu probable que cette collection soit destinée à de la vulgarisation pour le grand public. Nous supposons donc qu'il s'agit d'ouvrages pour des scientifiques n'étant pas spécialistes du domaine abordé.

Cette collection, qui s'intéresse aux « découvertes récentes », regroupe des ouvrages de deux catégories : physique-mathématiques ou biologie. La première traite de sujets comme l'électromagnétisme, avec des ouvrages de Poincaré ou du physicien Charles Maurain sur le magnétisme ; de l'optique, sur le phénomène de Zeeman ; mais également des mathématiques, avec Jacques Hadamard sur les séries de Taylor ; ou la chimie, avec par exemple un numéro sur la stéréochimie. Avec son ouvrage sur la théorie de Maxwell, Poincaré inaugure d'ailleurs cette collection, et connaîtra un succès manifeste puisque cette première édition sera rapidement épuisée. C'est probablement la raison pour laquelle, en 1904, il publiera un deuxième ouvrage, complété par un élément nouveau : *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes : la télégraphie sans fil*.¹³

11.2 L'éther de Maxwell vu par Poincaré

Poincaré présente la théorie de Maxwell dans son premier volume d'*Électricité et Optique* publié en 1890. Dans ce qui suit nous renverrons donc à ce volume, ainsi qu'à l'étude qu'en a fait Michel Atten dans sa thèse.¹⁴ Dès son introduction Poincaré met en garde le lecteur contre un certain nombre d'éléments qui pourraient le déstabiliser. Le premier est la méthode même de réflexion du savant écossais, qui mène — comme nous l'avons déjà évoqué dans les chapitres précédents — à l'absence d'une théorie rigoureuse, théorie qui devrait être pour un scientifique français comparable à la théorie optique :¹⁵

13. Poincaré 1899, Poincaré 1904 (a), supplément.

14. Voir Atten 1992, chap. 16, pp. 245-271.

15. Poincaré 1890, vol. I, p VII. Les italiques sont de Poincaré.

Ainsi, en ouvrant Maxwell, un Français s'attend à y trouver un ensemble théorique aussi logique et aussi précis que l'optique physique fondée sur l'hypothèse de l'éther ; il se prépare ainsi une déception que je voudrais éviter au lecteur en l'avertissant tout de suite de ce qu'il doit chercher dans Maxwell et de ce qu'il n'y saurait trouver. *Maxwell ne donne pas une explication mécanique de l'électricité et du magnétisme ; il se borne à démontrer que cette explication est possible.*

L'autre élément sur lequel Poincaré avertit le lecteur est l'incohérence qui peut survenir entre certains chapitres du *Treatise* de Maxwell. En particulier, « le chapitre où l'on explique les attractions électrostatiques par des pressions et des tensions qui règneraient dans le milieu diélectrique » pourrait, d'après lui, « être supprimé sans que le reste du volume en devint moins clair et moins complet », tout en reconnaissant que la théorie qui y est exposée est tout à fait cohérente *per se*.¹⁶

Dans l'étude qu'il fait de ce cours de Poincaré, Michel Atten s'intéresse particulièrement à ce qu'il présente comme « les points qui semblent les plus épineux, les plus controversés du *Treatise* », à savoir : « la représentation de l'électricité sous forme de fluide, l'introduction, de but en blanc, de la notion de déplacement électrique, les concepts de courants de conduction ou de déplacements, ou les plus novateurs : la théorie électromagnétique de la lumière, la polarisation rotatoire magnétique ». ¹⁷ Sur ces différents points, nous laissons le lecteur se reporter à la référence indiquée, et nous discuterons celui qui nous semble le plus en lien avec la notion d'éther et l'image qu'en donne Poincaré, à savoir la notion de fluide électrique. Nous discuterons également la théorie des diélectriques que présente Poincaré, et à laquelle nous reviendrons plus loin dans ce chapitre. Enfin, nous comparerons l'exposé que fait Poincaré de la théorie électromagnétique de la lumière avec celui qui en était fait par Becquerel.

Électricité et fluide inducteur

Dans le premier chapitre, dans lequel il rappelle les bases d'électrostatique (comme le calcul du flux, la relation de Poisson ou le théorème de Gauss), Poincaré mentionne notamment les hypothèses des deux fluides et celle du fluide unique. Pour cette dernière, il ajoute que la théorie de Maxwell s'y rattache. Cette précision nous semble illustrer ce qu'Atten met en

16. *Ibid.*, p VIII. Dans cette introduction, Poincaré souligne également l'apport majeur de Maxwell, à avoir l'utilisation du formalisme lagrangien pour décrire les interactions entre courants. Il développe d'ailleurs les bases de la mécanique lagrangienne à cette occasion. Voir : *Ibid.*, p. IX-XV.

17. Atten 1992, p. 245.

avant tout au long de son étude : Poincaré s'adresse à des scientifiques français, et il en a tout à fait conscience. Il fait ainsi référence à des idées largement acceptées. Lorsqu'il entame son deuxième chapitre — celui qui est dédié aux hypothèses de Maxwell — Poincaré donne comme hypothèse principale le rôle des milieux diélectriques, et surtout la présence d'un fluide vecteur des actions :¹⁸

La caractéristique de la théorie de Maxwell est le rôle prépondérant qu'y jouent les diélectriques. Maxwell suppose toute la matière des diélectriques occupée par un fluide élastique hypothétique, analogue à l'*éther* qui, en Optique, est supposé remplir les corps transparents ; il l'appelle *électricité*. Nous verrons par la suite la raison de cette dénomination, mais comme elle peut introduire dans l'esprit une confusion regrettable pour la clarté de l'exposition nous donnerons le nom de *fluide inducteur* à ce fluide hypothétique, conservant au mot *électricité* sa signification habituelle.

Quand tous les conducteurs situés dans le diélectrique sont à l'état neutre le fluide inducteur est en *équilibre normal*. Quand, au contraire, ces conducteurs sont électrisés et que leur système est dans l'état que l'on définit dans la théorie ordinaire en disant que le système est en équilibre électrique, le fluide inducteur prend un nouvel état d'équilibre que Maxwell appelle *équilibre contraint*.

La présentation que Poincaré fait de l'hypothèse de Maxwell illustre sa volonté pédagogique par deux aspects. D'une part, en comparant le fluide de Maxwell à l'éther, Poincaré fait référence à un concept bien connu, en particulier en France. D'autre part, afin d'éviter les incompréhensions (et contrairement à Maxwell) il prend soin de ne pas désigner par « électricité » ce fluide : il garde ce terme pour évoquer l'entité qui se déplace dans les conducteurs. Il choisit le terme général de « fluide inducteur » pour le milieu transmettant les actions dans les diélectriques. Dans sa citation, Poincaré dit que ce fluide est « analogue à l'éther », et il poursuit cette analogie (sans identifier les deux) assez longtemps : dans la plus grande partie de son ouvrage, il prend d'ailleurs bien garde de ne pas utiliser le terme « éther » pour parler de ce milieu électromagnétique. Les seules occurrences du mot « éther » lui servent uniquement à désigner le milieu luminifère. Ce n'est qu'à partir du chapitre portant sur la théorie électromagnétique de la lumière (chapitre XI) qu'il commence à parler d'éther dans le cadre de la théorie de Maxwell.

Pour décrire le comportement de ce fluide inducteur, Poincaré utilise d'abord les équations

18. Poincaré 1890, vol. I, p. 14. Les italiques et majuscules sont de Poincaré.

tions. Il reprend la définition de Maxwell pour le déplacement électrique \mathbf{D} comme étant lié au potentiel électrostatique Φ par la relation $\mathbf{D} = -\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \Phi$. Il utilise ensuite l'équation de Poisson $\Delta \Phi = -\rho / (\epsilon_r \epsilon_0)$ pour obtenir $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$. Cette égalité lui permet de montrer le lien entre fluide inducteur et électricité, car « si l'électricité est en mouvement le fluide inducteur [l'est] aussi ». Dans le cas d'un milieu neutre, il souligne la relation $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$ qui traduit l'incompressibilité du fluide inducteur. Poincaré montre également que lorsque le fluide inducteur se déplace (par exemple lorsqu'il passe d'un état normal à un état contraint sous l'effet d'une force extérieure), la quantité de fluide inducteur passant à travers une surface fermée est opposée à celle d'électricité. Poincaré résume cette égalité en disant que tout se passe comme si l'électricité « chassait » le fluide inducteur.¹⁹

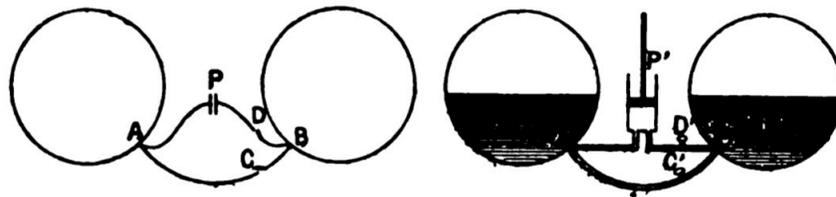


FIGURE 11.2 – Dessin illustrant l'analogie entre deux circuits électriques et deux réservoirs d'eau. Tiré de Poincaré 1890, vol. I, p. 18.

Dans un second temps il cherche à illustrer ce comportement par une analogie. Sur la figure 11.2, A et B sont deux circuits électriques reliés entre eux par un interrupteur C d'une part et une pile P avec un interrupteur D d'autre part. A' et B' sont deux réservoirs contenant de l'eau et de l'air, C' un robinet, P' et D' une pompe suivie d'un robinet. Poincaré montre que le lien entre fluide inducteur et électricité est analogue à celui entre air et eau, et que la force de pression de l'air est analogue à la force de rappel du fluide inducteur. Notons tout d'abord que pour simplifier ses propos, Poincaré fait intervenir les électricités négatives et positives, qui ne sont pas présentes chez Maxwell. Surtout, pour mener à bien cette comparaison, il fait intervenir la pression de l'air et sa compressibilité, alors que le fluide inducteur doit être incompressible. Le principal reproche que l'on puisse faire à cette analogie est que lorsque le niveau d'eau augmente dans l'un des réservoirs, la « quantité » d'air (on peut utiliser la quantité de matière ou la masse) ne diminue pas, seul son volume varie.

¹⁹. Poincaré 1890, vol. I, p. 15-17. Les notations sont nôtres. Poincaré utilise l'opérateur Δ pour le potentiel Φ mais pas le formalisme vectoriel.

Ce caractère ne permet pas de représenter la relation que Poincaré mettait en exergue auparavant, considérant que l'électricité remplaçait le fluide inducteur. Or l'incompressibilité du fluide inducteur est un argument majeur de Poincaré pour expliquer l'hypothèse de Maxwell selon laquelle il n'y a que des courants fermés. Dans le paragraphe suivant, Poincaré modifie son analogie en conséquence, en remplaçant l'air par du mercure. Plus dense que l'eau, le mercure est surtout un liquide incompressible qui permet de concevoir une analogie mécanique dans laquelle un fluide est effectivement « remplacé » par l'autre. Notons enfin que Lorentz, dans son mémoire de 1892 (dans lequel il expose ses premières idées sur les particules chargées), fait directement référence à cette explication de Poincaré.²⁰

La théorie des diélectriques

Le second point que nous souhaitons développer dans le cours de Poincaré est l'exposé qu'il fait de la théorie de Poisson-Mossotti pour les diélectriques, et le lien avec la théorie du fluide inducteur de Maxwell.²¹ Dans sa théorie, le physicien italien Ottaviano Mossotti suppose qu'un diélectrique est formé de sphères conductrices séparées par des parois non-conductrices. Il reprend en cela une hypothèse que Siméon Poisson avait faite pour expliquer le comportement magnétique du fer doux. Pour Mossotti, seul l'air est un diélectrique homogène ; dans un diélectrique quelconque c'est, d'après Poincaré, « un diélectrique jouissant des mêmes propriétés que l'air » qui sépare les sphères conductrices. Les diélectriques autres que l'air ont donc tous la même nature : c'est uniquement le volume relatif des sphères conductrices (c'est-à-dire la taille occupée par les sphères conductrices par rapport au diélectrique homogène constituant les parois) qui modifie les propriétés globales du matériau. Poincaré avance que c'est d'après les conceptions de Poisson et Mossotti, reprises dans un premier temps par Faraday, que Maxwell a été amené à sa théorie.²²

Il commence par montrer que la théorie de Mossotti ne permet pas forcément de retrouver les résultats de Maxwell. Chez Mossotti les cellules conductrices, considérées comme sphériques, sont neutres et contiennent les deux types d'électricité. Elles se polarisent donc sous l'effet d'une force électrique extérieure que l'on notera \mathbf{E}_{ext} . Les deux électricités étant séparées, une différence de potentiel apparaît, ce qui crée une force électrique induite. La force électrique totale (force extérieure plus force induite) est alors $\mathbf{E}_{tot} = \frac{3}{\epsilon_r + 2} \mathbf{E}_{ext}$, où ϵ_r est la permittivité relative du diélectrique. Le déplacement électrique de Maxwell s'exprime quant

20. Lorentz 1892, p. 391.

21. Ottaviano Mossotti (1791-1863) ; Siméon Poisson (1781-1840).

22. *Ibid.*, p. 41-2.

à lui simplement par $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}_{tot}$.

Poincaré cherche ensuite à comparer le déplacement électrique de Maxwell, dont nous venons de donner la définition, au déplacement de la théorie de Mossotti. Dans la théorie de Maxwell, nous avons déjà discuté de l'ambiguïté du mot « déplacement », qui a posé des problèmes à de nombreux lecteurs. Dans la théorie de Mossotti, au contraire, le déplacement électrique est un déplacement « réel », dû à la séparation entre l'électricité positive et l'électricité négative au sein des cellules. Nous noterons \mathbf{D}' cette grandeur. Poincaré donne le rapport des deux déplacements : $\frac{\|\mathbf{D}'\|}{\|\mathbf{D}\|} = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r}$.

Pour retrouver les résultats de Maxwell en utilisant la théorie de Mossotti, il faut que les valeurs des déplacements électriques coïncident, donc que le rapport ci-dessus tende vers 1. Or la seule possibilité est la limite $\epsilon_r \rightarrow \infty$. Pour mieux comprendre cette limite, Poincaré fait intervenir le volume relatif des cellules dans le diélectrique h , et montre que la permittivité relative s'exprime par $\epsilon_r = \frac{3h}{1-h}$. La limite $\epsilon_r \rightarrow \infty$ s'obtient pour un volume relatif tendant vers 1. Cela correspond à un diélectrique non plus constitué de sphères conductrices, mais de cellules de forme quelconque, séparées par des cloisons infiniment minces.²³

Outre l'égalité des déplacements électriques, Poincaré montre également qu'une théorie des cellules avec un passage à la limite permet de retrouver la relation qui correspondait, dans son chapitre précédent, à l'incompressibilité du fluide inducteur (la relation $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$). Mais s'il compare largement les résultats de ces hypothèses, en les développant la plupart du temps, il se garde bien de leur attribuer une réalité :²⁴

La théorie des cellules ne peut pas plus être adoptée définitivement que celle du fluide inducteur. Cette constitution hétérogène paraît difficile à admettre pour les diélectriques liquides ou gazeux *et surtout pour le vide interplanétaire*. J'ai tenu néanmoins à exposer ces deux théories : elles seraient incompatibles si on les regardait comme exprimant la réalité objective, elles seront toutes deux utiles si on les considère comme provisoires. Si je m'étais borné à développer l'une d'elles, j'aurais laissé croire (ce que croient bien des personnes, mais ce qui me semble faux) que Maxwell regardait le déplacement électrique comme le véritable déplacement d'une véritable matière.

23. En inversant la relation entre ϵ_r et h on obtient $h = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}$. Cette grandeur apparaît dans la relation dite de Clausius-Mossotti donnant le lien entre permittivité diélectrique relative ϵ_r et polarisabilité microscopique α des molécules d'un corps : $\frac{n\alpha}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}$, ϵ_0 étant la permittivité du vide et n la densité des molécules du corps.

24. *Ibid.*, p. 79. Les italiques sont de Poincaré.

La théorie électromagnétique de la lumière

Nous proposons ici de comparer le chapitre de Poincaré portant uniquement sur la théorie électromagnétique de la lumière avec le cours de Becquerel fait à Polytechnique (voir 6.3). Signalons dès maintenant que cette comparaison ne peut être qu'approximative, la première raison étant ce que nous pouvons appeler le « facteur d'échelle » : le cours de Poincaré dure un semestre, il est publié sur près de 300 pages, et le chapitre dédié en particulier à la théorie électromagnétique de la lumière s'étend lui-même sur 46 pages. À l'inverse, le cours de Becquerel s'inscrit dans un cours de physique plus général, la partie sur Maxwell se compose d'un premier chapitre sur les expériences et d'un second chapitre centré sur la théorie. Précisons tout de même que le cours de Becquerel est manuscrit (celui de Poincaré est typographié), et que la mise en page est beaucoup plus resserrée chez Becquerel, ce qui entraîne un chapitre sur la théorie qui ne fait que 16 pages. Il semble toutefois contenir moins d'information que celui de Poincaré.²⁵

Ceci étant dit, regardons la démarche des deux enseignants sur ce chapitre en particulier. Ils commencent tous deux par rappeler les grandes idées de Maxwell : Poincaré en faisant référence à ses chapitres antérieurs, Becquerel en introduisant succinctement les idées principales, dont la notion de courant de déplacement. Concernant l'établissement de la propagation, ils expriment la force électrique comme somme de deux termes, puis font apparaître une quantité similaire mais de façon différente : Poincaré introduit un vecteur \mathbf{A} tel que la force électrique s'écrive $\mathbf{E} = -\nabla \Phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$; Becquerel n'introduit pas explicitement cette quantité, il conserve l'expression $\mathbf{E} = -\nabla \Phi - \mu \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{\mathbf{j}}{r} dV$ en gardant une forme intégrale.

De fait, il est aisé pour Poincaré d'établir directement l'équation de propagation sur le vecteur \mathbf{A} :²⁶

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = \Delta \mathbf{A} - \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A})$$

puis d'en tirer par linéarité l'équation sur l'induction magnétique (ou la force magnétique, puisqu'il considère le facteur μ constant). Cependant il ne donne jamais l'équation de propagation pour le déplacement électrique (ou la force électrique). Dans la suite de son raisonnement, il utilise principalement l'équation avec le potentiel vecteur, notamment lorsqu'il étudie le cas d'une onde plane pour lequel il montre l'égalité de la vitesse de propagation avec le ratio des unités électromagnétique et électrostatique. Becquerel en revanche donne

25. Pour toute cette partie voir : Poincaré 1890, vol. I, pp. 192-238 et Becquerel 1897, pp. 510-528.

26. Le terme en $\nabla \cdot \mathbf{A}$ peut être éliminé en utilisant une hypothèse de jauge.

directement l'équation de propagation pour la force électrique, dans le cas d'un diélectrique ou d'un conducteur. C'est sur cette équation qu'il se base pour montrer l'égalité de la vitesse des ondes lumineuses et électromagnétiques. Ce n'est qu'ensuite qu'il établit l'équation dans le cas de la force magnétique.

Hormis l'utilisation du potentiel vecteur de façon explicite, la grosse différence entre les deux cours est la présence du déplacement électrique chez Poincaré, qui n'est jamais mentionné chez Becquerel. La raison est simple : c'est un objet difficile à appréhender dans la théorie de Maxwell, objet que Poincaré a pu largement détailler au cours de ses premiers chapitres. Becquerel n'a fait que mentionner l'existence de courants de déplacement dans son introduction à Maxwell, et a donné l'expression de ce courant en faisant intervenir la force électrique, $\mathbf{j}_D = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$. Par conséquent lorsque Poincaré s'intéresse à la direction du déplacement électrique lors de la propagation, Becquerel regarde lui la direction de la force magnétique.

Les deux enseignants traitent du cas des milieux anisotropes. Becquerel a établi auparavant les relations de continuité à l'interface entre deux milieux, pour la réflexion et la réfraction, ce que Poincaré ne fait qu'après. Ils donnent tous deux l'expression de l'énergie électromagnétique par unité de volume, mais ce point est très rapide chez Becquerel et bien plus développé chez Poincaré. Sur la question de l'énergie, Poincaré utilise d'ailleurs toujours le potentiel vecteur. Enfin, ce dernier termine par un point qui n'est pas présent chez Becquerel : les pressions et tensions dans un diélectrique transmettant la lumière, point qu'il développe largement, ainsi que l'interprétation de ces pressions. Il fait ici écho à l'un de ses chapitres précédents (chapitre 4 de son cours) dans lequel il abordait ces notions.

Pour résumer cette étude comparative, nous trouvons chez Becquerel et Poincaré plusieurs similitudes dans les informations données. L'établissement de l'équation de propagation, l'étude de la réflexion et de la réfraction, l'expression de l'énergie électromagnétique et le cas des diélectriques anisotropes sont les résultats essentiels de la théorie. Au niveau du formalisme, l'utilisation du potentiel vecteur chez Poincaré est plus simple, mais ne dénote pas de notion spécifique à Maxwell. Sur cette question des outils mathématiques on pourra également noter l'utilisation par Becquerel du formalisme complexe dans la résolution de l'équation.

D'autres points marquent des différences profondes, principalement la présence de la notion de déplacement électrique chez Poincaré, notion complètement absente chez Becquerel. Corollaire de cette différence, Poincaré présente régulièrement le terme de courant de déplacement comme une vitesse de déplacement, montrant bien que ce courant est la dérivée

temporelle d'une grandeur. Becquerel ne donne pour le courant de déplacement que l'expression en fonction de la force électrique. Ce point particulièrement difficile à appréhender de la théorie de Maxwell nécessite un temps d'explication dont Becquerel ne dispose pas, contrairement à Poincaré. Il en est de même pour l'explication des pressions à l'intérieur du milieu. Mais ces points ne sont pas nécessaires dans l'établissement des équations sur les grandeurs mesurables que sont les forces électrique et magnétique. Lorsque Poincaré enseigne la théorie, Becquerel enseigne les équations.

La théorie de Maxwell imagée

Dans le premier livre qu'il publie dans la collection *Scientia*, Poincaré n'aborde que peu la théorie de Maxwell, accordant une grande partie de l'ouvrage aux oscillations électriques en elles-mêmes, en particulier la description des moyens techniques (excitateur de Hertz, résonateur), à la mesure de la longueur d'onde, et aux autres expériences comme celles de Fizeau et Gounelle (voir 6.3 p. 181), ou celle de Blondlot. Poincaré évoque les idées mécanistes de Maxwell dans le premier chapitre, mais seul le chapitre 2 traite « en détail » de la théorie de Maxwell. L'utilisation des guillemets nous sert ici à souligner le type d'ouvrage : il s'agit avant tout de diffusion scientifique destinée à un public non averti, ou tout du moins peu au fait des méthodes et du formalisme de la physique. Aucune équation n'est présente, et Poincaré utilise largement les analogies (en particulier mécaniques) pour faire comprendre certains concepts. Si cette méthode est assez habituelle chez lui (comme nous l'avons vu plus haut), Poincaré l'utilise ici plus encore que comme une simple illustration.

Cet objectif est clairement mis en avant avec le premier chapitre, dans lequel Poincaré traite des « Généralités sur les phénomènes électriques ». De manière récurrente, il utilise l'analogie hydraulique ou mécanique pour faire comprendre certains phénomènes : charge et décharge d'un condensateur, résistance d'un conducteur, induction, etc. Sans détailler tous ces éléments, il nous semble intéressant de commenter le tout premier paragraphe de ce chapitre, dans lequel Poincaré évoque justement les tentatives de description mécaniste des phénomènes électriques. Il considère d'ailleurs ces essais comme vains, car, d'après lui, « si l'on peut imaginer [un modèle], on pourra en imaginer une infinité d'autres ». Le regard qu'il porte sur la tentative de Maxwell est d'ailleurs sans concession lorsqu'il évoque le système mécanique du Britannique (voir 2.3) :²⁷

27. Poincaré 1899, p. 5. Cette approche de Poincaré a notamment été étudiée par le philosophe des sciences Élie Zahar qui lui attribue un « réalisme structurel » (voir Zahar 2000).

L'un des plus complets avait été développé par Maxwell, à une époque où ses idées n'avaient pas encore pris leur forme définitive. La structure compliquée qu'il attribuait à l'éther rendait son système bizarre et rébarbatif : on aurait cru lire la description d'une usine avec des engrenages, des bielles transmettant le mouvement et fléchissant sous l'effort, des régulateurs à boules et des courroies.

Quel que soit le goût des Anglais pour ce genre de conceptions dont ils aiment l'apparence concrète, Maxwell fut le premier à abandonner cette théorie saugrenue qui ne figure pas dans ses œuvres complètes.

La lecture de ce passage fait bien évidemment penser aux propos que Pierre Duhem porte sur le livre d'Oliver Lodge dans son livre *La Théorie Physique* (voir 3.3 p. 91), et il semble difficilement concevable que Duhem n'ait pas lu cet extrait de Poincaré, tant la ressemblance est frappante. De plus, rappelons ici que Poincaré ne critique que le modèle mécanique de Maxwell, et non la théorie dans son ensemble (il souligne d'ailleurs l'absence de ce modèle dans les œuvres complètes, c'est-à-dire le *Treatise*). Ce jugement peut paraître surprenant venant de Poincaré, très favorable aux idées de Maxwell, et étant lui-même un adepte de l'utilisation d'analogies, ce livre en est d'ailleurs l'illustration. Nous touchons probablement ici la différence entre l'analogie, à laquelle Poincaré est favorable, et le modèle, dans lequel il refuse de tomber. L'autre explication qu'il faut garder en tête est, comme souvent avec Poincaré, la nature de son lectorat : il s'agit d'un ouvrage destiné à des scientifiques — mais non physiciens — français, qui sont donc très peu habitués à des notions que Poincaré lui-même souligne comme typiquement britanniques.²⁸

Le deuxième chapitre, qui s'intitule simplement « La théorie de Maxwell », est décliné en trois grands paragraphes, que Poincaré dédie à trois points caractéristiques : les rapports entre la lumière et l'électricité, les courants de déplacement, et la nature de la lumière, ce dernier pouvant sembler redondant. Dans le premier paragraphe Poincaré commence par pointer la quasi-simultanéité des travaux de Fresnel sur la théorie ondulatoire de la lumière et ceux d'Ampère sur les courants électriques. Il avance également qu'Ampère avait imaginé la possibilité que le fluide porteur des actions électriques soit le même que l'éther lumineux, sans que cette idée ne soit développée. La première mention de Maxwell que fait Poincaré porte sur la nature du ratio des unités électrostatique et électrodynamique, correspondant à une vitesse, et dont la valeur avoisine celle de la vitesse de la lumière. Poincaré pointe ici l'impossibilité d'expliquer cette égalité en se basant sur « l'ancienne électrodynamique », et

28. Après Hertz (voir note p. 290) notons ici la mauvaise habitude des physiciens de renom de qualifier l'écossais Maxwell d'« Anglais » !

justifie la nécessité de modifier largement celle-ci « pour pouvoir [en] tirer l'optique ». ²⁹

Poincaré présente ensuite la principale avancée de Maxwell comme étant la considération des diélectriques comme des éléments essentiels dans la propagation. Il précise que cette idée avait déjà été mise en avant par Faraday. Pour présenter le rôle concret du milieu diélectrique, Poincaré se base sur une assertion : l'existence de courants dans un diélectrique. Il se heurte à l'opposition dichotomique entre isolants et conducteurs, les premiers empêchant un courant de circuler contrairement aux seconds. Poincaré est d'ailleurs totalement conscient de cet obstacle dans la compréhension générale de l'électricité. Aussi se hâte-t-il de préciser que ces courants de déplacement ne se manifestent pas de la même façon que leurs homologues de conduction, car la résistance du milieu est « d'une autre nature ». Mais comment décrire, sans s'appuyer sur les équations ou sur le concept de force électrique, ces courants de déplacement ? Là encore, Poincaré utilise l'analogie comme une méthode de démonstration : sous l'effet d'une force motrice, un courant de déplacement est comme une déformation de ressorts, sans perte d'énergie (car élastique) mais limité par la tension maximale du ressort, quand un courant de conduction s'apparente à un mouvement dans un fluide, qui dure tant que la force est présente, mais qui dissipe de la chaleur par frottement. Notons que sur ce point, Poincaré ne donne aucune hypothèse sur la nature de ces ressorts, c'est-à-dire sur le milieu vecteur du déplacement électrique.

Le dernier point qu'il évoque porte sur la « nature de la lumière », auquel il arrive après avoir montré l'inexistence de courants de déplacement permanents, toujours en se basant sur l'analogie avec un ressort : ³⁰

Pourquoi ces effets n'ont-ils encore pu être mis en évidence ? C'est parce qu'un courant de déplacement quelque peu intense ne peut durer longtemps, *dans le même sens* : car la tension de nos ressorts, sans cesse croissante, l'arrêterait bientôt. Il ne peut donc y avoir dans les diélectriques, ni courant continu de longue durée, ni courant alternatif sensible de longue période. Les effets deviendront au contraire observables si l'alternance est très rapide.

Insistons, dans cet extrait, sur l'absence de toute considération numérique ou caractéristique d'un milieu : seule la notion de ressort, que Poincaré tire de son analogie, lui sert à justifier la condition pour avoir des courants de déplacement observables, à savoir une haute fréquence.

Concernant la nature de la lumière, Poincaré discute rapidement le lien entre l'éther et les

29. Poincaré 1899, p. 14.

30. Poincaré 1899, p. 17.

ondes lumineuses chez Fresnel, transversales (voir Annexe n°2), et les perturbations prédites par Maxwell. Utilisant une fois encore l'analogie, cette fois avec la propagation du son dans l'air, Poincaré avance que :³¹

S'il y avait des courants ouverts, l'électricité se portant d'un bout à l'autre d'un de ces courants s'accumulerait à l'une des extrémités : elle se condenserait ou se raréfierait comme l'air, ses vibrations seraient longitudinales. Mais Maxwell n'admet que des courants fermés ; cette accumulation est impossible, et l'électricité se comporte comme l'éther incompressible de Fresnel, ses vibrations sont transversales.

La présentation des idées de Maxwell (plutôt que de la théorie à proprement parler) que fait Poincaré dans son ouvrage demeure un difficile exercice d'équilibriste : il cherche à mettre en avant les idées du Britannique sans utiliser certaines notions centrales — comme la force magnétique ou l'induction électrique —, ni le formalisme mathématique. Sur certains concepts, Poincaré utilise tout son talent de pédagogue, et l'analogie qui lui sert habituellement d'outil d'illustration devient une ligne directrice nécessaire : ainsi, le courant de déplacement est largement expliqué selon cette méthode. Sur certains points toutefois, il est impossible pour Poincaré de détailler des notions auxquelles il est pourtant attaché. Ainsi, dans le dernier extrait, c'est bien de « l'électricité » dont il parle, plutôt que du fluide inducteur, distinction qu'il prend tellement soin de préciser dans son cours.

11.3 Les théories de Hertz et Lorentz par Poincaré

En 1901, Poincaré publie une seconde édition du livre *Électricité et Optique*. Il reprend presque intégralement le volume 1 sur la théorie de Maxwell, à l'exception de l'ultime chapitre de ce dernier sur les « Vérifications expérimentales des hypothèses de Maxwell ». La raison en est évidente, puisqu'il a depuis publié un volume entier en 1894 consacré aux expériences de Hertz. Ce dernier point n'apparaît d'ailleurs plus dans la nouvelle édition ; la deuxième partie du livre de 1901 reprend seulement la moitié du second volume paru en 1892, et traite des théories d'Ampère, Weber et Hertz. Cette partie est légèrement résumée par rapport à la partie du volume initial (100 pages contre 128 dans celui de 1892). Surtout, dans cette nouvelle édition, Poincaré ajoute les théories électrodynamiques qui ont émergé, en particulier celle de Hertz et celle de Lorentz. En plus de les détailler assez largement (230 pages pour les deux), Poincaré livre une analyse comparative sur plusieurs points : explication des

31. *Ibid.*

phénomènes optiques, vérification des principes de mécanique, rôle des diélectriques, etc.

La théorie de Hertz

Lorsqu'il présente les idées de Hertz, Poincaré commence par rappeler les différentes théories qui ont émergé successivement pour expliquer les actions électriques et leur propagation : action à distance ; théorie du potentiel ; polarisation du diélectrique (théorie que nous avons décrite plus haut). Sur cette dernière, Poincaré précise que si le rôle principal est attribué aux cellules, l'action à distance doit être conservée pour expliquer l'influence électrique (et donc la polarisation) des cellules. Enfin, il évoque la possibilité de supprimer tout recours aux actions à distance, avec la théorie de Maxwell qui se base sur une polarisation du diélectrique. Pour expliquer le raisonnement de Hertz, Poincaré choisit d'ailleurs de partir des deux reproches que le savant allemand fait sur cette dernière théorie, reproches que Poincaré mettait déjà en évidence dans son premier cours : l'ambiguïté du mot « électricité », qui désigne à la fois « l'électricité dans le sens vulgaire, dans le sens fluide incompressible, etc. », et la diversité des idées que Maxwell présente dans le *Treatise*, parfois non cohérentes entre elles. Poincaré résume en ces termes la démarche de Hertz :³²

En somme, Hertz n'admet que les équations établies par Maxwell, en laissant de côté le texte de son ouvrage classique comme étant obscur, et il essaie, en se posant ses équations finales d'avance, de faire une théorie y conduisant. C'est cette théorie de Hertz que nous nous proposons d'exposer et discuter en détail.

Ces quelques lignes résument parfaitement la démarche de Hertz. Et avec une telle présentation, on ne peut s'attendre à voir l'éther — ou un quelconque fluide inducteur — jouer un rôle majeur dans le discours de Poincaré sur les travaux du scientifique allemand. Dans toute sa partie consacrée à la théorie de Hertz, Poincaré ne mentionne à aucun moment l'éther ou un concept similaire. Reprenant les deux mémoires de Hertz, il divise son étude en deux chapitres, le premier dédié à l'électrodynamique des corps au repos, le second aux corps en mouvement. Pour les corps au repos, il commence par rappeler la conception de Maxwell sur l'existence de courants fermés, et les relations afférentes. Il donne ensuite la définition de l'électricité et du magnétisme chez Hertz, comme les flux des différents vecteurs (voir 16 p. 106 en note). Il insiste d'ailleurs sur la définition que le savant allemand donne :³³

32. Poincaré 1901, p. 343-4.

33. *Ibid.*, p. 353.

Nous voyons donc que, pour Hertz, ce qu'on appelle électricité et magnétisme ce n'est pas un fluide, ce n'est pas quelque chose de matériel, mais bien une expression purement analytique : une intégrale ; ce qui existe effectivement c'est la force électrique et la force magnétique.

Poincaré termine son chapitre par la vérification des principes de conservation, pour l'électricité, le magnétisme, et l'énergie. Notons qu'il ne traite pas ici le principe de réaction.

Dans son second chapitre, Poincaré reprend une démarche très semblable lorsqu'il s'intéresse à l'électrodynamique des corps en mouvement. Dans son exposé, la seule différence — qui n'en est pas moins importante — est la forme des équations. En écrivant l'intégration des grandeurs, il est nécessaire de faire une hypothèse sur le contour d'intégration. Plusieurs possibilités s'offrant au savant allemand, Hertz choisit celle permettant la résolution la plus simple des équations, hypothèse que Poincaré met bien en avant : « Hertz *admet* qu'on doit considérer la surface S comme étant entraînée dans le mouvement de la matière. ». ³⁴

La surface d'intégration étant complètement entraînée par le mouvement, les équations gardent la même forme dans le référentiel absolu ou dans le référentiel relatif attaché au mouvement. Et les conséquences sont mitigées, comme le signale Poincaré : ³⁵

Cette dernière remarque entraîne deux conséquences : l'une heureuse, l'autre fâcheuse. La conséquence heureuse c'est que les équations de Hertz sont conformes au principe de l'égalité de l'action et de la réaction ; la conséquence fâcheuse, c'est que ces équations ne peuvent pas rendre compte de certains phénomènes optiques.

Poincaré fait ici référence à l'expérience de Fizeau sur l'entraînement partiel de l'éther et des ondes lumineuses dans l'eau (voir Annexe n° 3), qui contredit l'hypothèse de Hertz selon laquelle les équations conserveraient leur forme dans un référentiel en mouvement. Soulignons que Hertz avait conscience de cette contradiction, et que cette hypothèse était faite avant tout pour sa simplicité. Poincaré cherche ensuite à vérifier si une modification des équations de Hertz pourrait permettre d'expliquer un entraînement partiel. ³⁶

Rappelons tout d'abord l'expression de la dérivée temporelle totale pour un flux \mathbf{F} quelconque, en utilisant la notation $[\mathbf{F}]$ de Poincaré qui désigne la partie convective de la dérivée

34. *Ibid.*, p. 378. Les italiques sont de Poincaré.

35. *Ibid.*, p. 389.

36. Dans ses articles de 1895 publiés dans l'*Éclairage Électrique* (voir Poincaré 1895), Poincaré fait déjà cette remarque selon laquelle les équations de Hertz ne peuvent expliquer l'entraînement partiel des ondes. Il suit une démarche différente de celle de son cours, en ne cherchant pas à *modifier* les équations de Hertz, mais en regardant si la théorie de Fresnel peut expliquer les résultats électriques. Voir 10.2 p. 326.

temporelle (pour des raisons de commodité nous utilisons la notation vectorielle que n'utilise pas Poincaré) :

$$\frac{D\mathbf{F}}{Dt} = \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial t} - \nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mathbf{F}) + (\nabla \cdot \mathbf{F})\mathbf{v} = \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial t} - [\mathbf{F}]$$

Alors les équations de Hertz dans le vide sont (voir p. 108) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial\mu\mathbf{H}}{\partial t} - [\mu\mathbf{H}] &= -\nabla \wedge \mathbf{E} \\ \frac{\partial\epsilon\mathbf{E}}{\partial t} - [\epsilon\mathbf{E}] &= \nabla \wedge \mathbf{H} \end{aligned} \tag{11.1}$$

Notons que le vecteur $\epsilon\mathbf{E}$ correspond au déplacement électrique \mathbf{D} chez Hertz, qui diffère de la définition de Maxwell d'un facteur 4π .³⁷ Poincaré montre qu'en affectant le terme de dérivée convective d'un coefficient, il est possible de retrouver l'entraînement partiel des ondes lumineuses. Sur ce point il ne parle pas d'entraînement de l'éther, mais bien d'entraînement des ondes lumineuses qui circulent dans un diélectrique en mouvement. Pour la première équation, le coefficient devant le terme en $[\mu\mathbf{H}]$ est $\frac{\epsilon-\epsilon_0}{\epsilon}$. Il souligne néanmoins que l'introduction de ce terme est purement *ad hoc*, et qu'elle contredit les expériences d'induction magnétique (sans préciser auxquelles il pense) qui dépendent « directement du terme $[\mu\mathbf{H}]$ ». ³⁸ Il conclut en signalant la difficulté pour la théorie de Hertz à expliquer les observations optiques, « difficultés que la théorie de Lorentz avait pour but de contourner ». ³⁹

La théorie de Lorentz

Poincaré débute la partie sur la théorie de Lorentz de la même façon qu'il avait terminé celle sur la théorie de Hertz, avec un paragraphe qui résume parfaitement sa démarche de comparaison : ⁴⁰

37. Sur la question du facteur 4π voir : Heaviside et Lodge 1892.

38. Pour la seconde équation Poincaré précise que le coefficient n'affecte que le terme en $\nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \epsilon\mathbf{E})$ (courant de Röntgen) et non le terme courant de Rowland en $(\nabla \cdot \epsilon\mathbf{E})\mathbf{v}$, terme qui s'annule dans le cas d'ondes lumineuses transversales. Cette difficulté n'apparaît pas dans le cas du terme magnétique $\nabla \cdot \mu\mathbf{H}$, qui est nul.

39. *Ibid.*, p. 393.

40. *Ibid.*, p. 422. De manière générale Poincaré est attaché aux principes (contrairement à Lorentz par exemple). Il les liste dans sa conférence de Saint-Louis en 1904, reproduite dans *La Valeur de la Science*. Dans son intervention intitulée « L'état actuel de la physique », Poincaré reprend les grandes théories de la physique dans différents domaines et met en évidence leurs liens avec les grands principes qui guident le physicien : « le principe de conservation de l'énergie », « le principe de Carnot, ou principe de dégradation de l'énergie », « le principe de Newton ou principe de l'égalité de l'action et de la réaction », « le principe de la relativité,

La théorie de Hertz est, comme nous l'avons vu, parfaitement cohérente ; mais si elle rend compte des phénomènes électriques elle ne rend pas compte de certains phénomènes optiques et en particulier des phénomènes optiques en mouvement (entraînement partiel des ondes lumineuses, aberration astronomique, etc.). En revanche, elle est parfaitement en accord avec le principe de la conservation de l'énergie, avec le principe de la conservation de l'électricité et du magnétisme, et avec le principe de l'égalité de l'action et de la réaction. Nous allons, maintenant, exposer une nouvelle théorie électrodynamique qui explique assez bien les phénomènes optiques qui ne pouvaient pas être expliqués par la théorie de Hertz, mais qui, malheureusement, n'est pas conforme au principe de l'égalité de l'action et de la réaction : c'est la Théorie de Lorentz.

Poincaré rappelle les hypothèses centrales de la théorie du hollandais : il n'y pas de magnétisme (les effets sont dus aux courants particuliers d'Ampère) et la charge électrique est localisée sur la matière, sur des corps tenus indéformables que Poincaré désigne par la suite par « ions ». Et c'est ici que la différence essentielle de sa présentation intervient : chez Lorentz, l'établissement d'un bilan énergétique nécessite de considérer à la fois la contribution de la matière (les ions) et la contribution de l'éther, siège des forces électriques et magnétiques. Cette distinction, qui n'avait pas lieu d'être chez Hertz (toute la matière diélectrique étant constituée de la même façon) fait que Poincaré emploie régulièrement le concept d'éther pour Lorentz. Pour établir les équations entre les différentes grandeurs, il utilise comme Lorentz une méthode lagrangienne.⁴¹ Il fait intervenir l'éther lorsqu'il considère l'énergie cinétique du système :⁴²

Désignons par T la force vive totale du système ; elle se compose de la force vive de la matière, T' , et de la force vive de l'éther que je désignerai par T'' . On aura donc $T = T' + T''$.

La force vive de l'éther T'' que Poincaré considère correspond uniquement à l'énergie

d'après lequel les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes, soit pour un observateur fixe, soit pour un observateur entraîné dans un mouvement de translation uniforme », « le principe de conservation de la masse, ou principe de Lavoisier » auquel Poincaré dit ajouter « le principe de moindre action ». Ces principes servent de « guides » au physicien, en particulier en période de crise. Voir la conférence donnée en 1904 par Poincaré (Poincaré 1904 (c)).

41. Lorentz utilise cette méthode dès 1892 pour déterminer les « équations qui déterminent l'état de l'éther », voir Lorentz 1892, p. 438-9.

42. *Ibid.*, p. 422.

magnétique. L'énergie électrique est elle comprise dans l'énergie potentielle du système, qu'il note U . L'utilisation de l'éther pour la théorie de Lorentz va d'ailleurs plus loin, puisque Poincaré lui attribue des coordonnées. Rappelons en quelques mots la base du raisonnement lagrangien : soit S un système quelconque décrit par N coordonnées q_1, q_2, \dots, q_N et soumis à des forces conservatives. Il possède une énergie cinétique T et une énergie potentielle U . Construisons la grandeur $L = T - U$ (le lagrangien, à ne pas confondre avec l'opérateur vectoriel « lagrangien » Δ). Alors le mouvement peut être décrit par les N équations de Lagrange :⁴³

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

où \dot{q}_i est la dérivée temporelle de la coordonnée q_i . Les forces en jeu dérivant d'un potentiel scalaire simple (donc uniquement des coordonnées et non de la variable temporelle) on peut écrire :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \left(\frac{\partial T}{\partial q_i} - \frac{\partial U}{\partial q_i} \right) = 0$$

Une précision s'impose ici : dans l'électromagnétisme classique actuel, la force (dite « de Lorentz ») $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$ dérive d'un potentiel généralisé dépendant notamment de la vitesse du système, donc des variables \dot{q}_i . Mais dans le raisonnement de Lorentz, il n'existe pas de magnétisme naturel, donc les forces qui agissent sur le système et qui interviennent dans l'énergie potentielle sont uniquement électriques (ou éventuellement d'un autre type, comme la pesanteur), mais le terme de magnétisme n'est pas présent dans l'énergie potentielle U .

C'est ici que Poincaré est amené à établir une distinction importante : il applique la méthode à un système complet, c'est-à-dire à la matière (donc les charges électriques) et à l'éther. En conséquence, dans le calcul des termes $\frac{\partial U}{\partial q_i}$, il distingue les coordonnées qui décrivent la position de la matière (le centre de gravité des particules) et celles qui définissent « la position de l'éther » :⁴⁴

43. Les équations de Lagrange sont des relations obtenues à partir d'une condition d'extremum sur l'action, qui est l'intégrale du lagrangien par rapport au temps.

44. *Ibid.*, p. 430. la notation vectorielle est nôtre.

La matière et par suite l'électricité ne seront pas affectées par la variation de ces coordonnées [de la deuxième sorte]; par contre, le déplacement \mathbf{D} subira des variations, car le vecteur \mathbf{D} est fonction de la position de l'éther.

Maintenant, quand les variables de la première sorte subiront des accroissements, ces variations affecteront en même temps la matière et l'éther : l'électricité et le déplacement électrique.

Poincaré parle régulièrement de la position « de » l'éther pour parler de ces variables de la deuxième sorte : il s'agit en fait de déplacement « dans » l'éther. Les premières équations que Poincaré établit sont d'ailleurs les « équations qui définissent l'état de l'éther », ⁴⁵ qui se résument à l'équation

$$\frac{\partial \mu_0 \mathbf{H}}{\partial t} = -\nabla \wedge \mathbf{E}$$

On constate que cette relation est l'une des deux équations de Maxwell ne faisant pas intervenir de terme source, elle ne décrit donc que l'état de l'éther. Immédiatement après, Poincaré compare celle-ci à l'équation obtenue par la théorie de Hertz, qui était :

$$\frac{\partial \mu \mathbf{H}}{\partial t} - [\mu \mathbf{H}] = -\nabla \wedge \mathbf{E}$$

Le facteur μ est pris égal à l'unité (pour nous μ_0) chez Lorentz, car il n'y a pas de magnétisme. D'autre part, il n'y a qu'un seul corps diélectrique chez Lorentz, l'éther, de pouvoir inducteur ϵ_0 . Poincaré montre que les deux équations se rejoignent si l'on introduit chez Lorentz un terme supplémentaire de courants. ⁴⁶

Dans un second temps Poincaré regarde le cas des variables de la première sorte, qui décrivent la position de la matière. Il retombe ainsi sur l'expression de la résultante qui s'applique sur une particule (l'intégrale étant étendue sur tout l'espace) :

$$\mathbf{R} = \int \rho \mathbf{E} dV + \int \rho \mathbf{v} \wedge \mu_0 \mathbf{H} dV \quad (11.2)$$

Nous reviendrons plus loin sur l'expression de cette force et ses conséquences. Dans la suite du cours, Poincaré aborde le cas d'un « observateur ayant les sens grossiers », c'est-à-

45. *Ibid.*

46. Il s'agit du courant de Röntgen (voir page 356 en note). Ce courant a été mis en évidence par le physicien Wilhem Röntgen, qui deviendra célèbre pour sa découverte du rayonnement X en 1895. Ce courant correspond à la variation de la polarisation lors du mouvement du corps. Il apparaît de façon indépendante chez Hertz, mais chez Lorentz, où la polarisation est liée à la matière, il est compris dans la dérivée totale. C'est ce que Liénard désigne, dans ses articles, par « courant de déplacement », et que nous préférons appeler « courant de polarisation » (voir le chapitre suivant).

dire en utilisant un point de vue macroscopique. Il retrouve les lois d'électrocinétique, dont l'expression de la force électromotrice d'induction, et explique le phénomène de Hall.⁴⁷

Les chapitres suivants abordent le rôle des diélectriques. Poincaré établit les équations dans le cas d'un diélectrique de Lorentz. Pour ce dernier, un diélectrique est « parsemé de particules chargées » mais, à l'inverse des conducteurs, elles ne peuvent s'éloigner de leur position d'équilibre car elles sont soumises à une force que Poincaré attribue dans son cours aux autres particules voisines.⁴⁸ Il traite de l'électrostatique, des diélectriques au repos, puis de ceux en mouvement. Dans ces deux derniers cas, il compare la notion de déplacement électrique chez Lorentz et chez Hertz. Il insiste notamment sur le fait que le vecteur $\epsilon\mathbf{E}$ chez Hertz désignait le déplacement total, comprenant « en bloc » le déplacement du diélectrique et la polarisation.⁴⁹ Chez Lorentz, $\epsilon_0\mathbf{E}$ ne désigne que le déplacement du diélectrique, correspondant à celui dans l'éther, auquel il faut ajouter le déplacement de la particule, qui donne la polarisation. Dans le chapitre qui aborde les phénomènes optiques dans un corps en mouvement, le terme « éther » n'apparaît finalement que très peu, uniquement au début du chapitre lorsque Poincaré évoque la théorie de Fresnel et l'entraînement partiel de l'éther. Il montre qu'en négligeant les termes d'ordre 2 en v/c , le phénomène des aberrations astronomiques est expliqué par la théorie de Lorentz. Mais il est intéressant de constater qu'à aucun moment Poincaré n'a besoin de la notion d'éther dans sa démonstration et qu'il n'utilise que les relations de changement de référentiel.⁵⁰ Lorsqu'il calcule le coefficient d'entraînement, il considère celui-ci comme le coefficient d'entraînement des ondes lumineuses, et non du milieu.

Le paragraphe cité plus haut illustre bien l'utilisation que Poincaré fait du concept d'éther. Pour exposer la théorie de Hertz, il n'en a aucune utilité : les phénomènes électriques sont tous localisés dans un même référentiel, et dans le cas des corps en mouvement ce référentiel (par exemple la surface d'intégration) reste complètement attaché au corps. Pour le décrire mathématiquement, il suffit de considérer que la surface (ou le contour) d'intégration est liée au mouvement. Lorsqu'il expose la théorie de Lorentz, à l'inverse, l'éther a un rôle fondamental : c'est un référentiel privilégié. À chaque fois que Poincaré l'utilise, c'est pour différencier le mouvement (ou les coordonnées) de la matière avec celui de l'effet électrique ou magnétique (notamment le déplacement électrique), qui sont eux rattachés à l'éther. Mais cette définition

47. Le « phénomène de Hall » ou « effet Hall » découvert par le physicien américain Edwin Hall (1855-1938) est l'apparition d'une force électromotrice transversale lors du passage d'un courant dans un conducteur soumis à un champ magnétique.

48. *Ibid.*, p. 475.

49. *Ibid.*, p. 483.

50. Nous parlons ici de « changement de référentiel » pour simplifier notre propos, il s'agit en fait d'une « transformation active ». Nous reviendrons sur cette démarche dans le chapitre sur Liénard.

est une vision non-matérielle de l'éther, auquel aucune grandeur mécanique n'est attachée. Ce point est remis en question dans le traitement du principe de réaction.

Le principe de réaction

Le traitement de la question du principe de réaction par Poincaré apporte un éclairage sur la conception de l'éther et du champ électromagnétique en général. En mécanique classique, le principe d'égalité de l'action et de la réaction (que nous abrègerons par « principe de réaction ») stipule que deux corps exercent l'un sur l'autre des actions « égales et opposées » selon la formule en usage, c'est-à-dire égales en norme et en direction, mais opposées en sens. Si l'on applique ce principe à un corps isolé, comme ce corps ne peut exercer de force sur aucun autre, il s'en suit que la résultante des forces subies par ce corps doit nécessairement être nulle. Si l'on applique ce principe à l'électrodynamique, le résultat varie selon la théorie. Dans le cas de Lorentz, Poincaré nous dit :⁵¹

Supposons, en effet, une particule chargée isolée et une perturbation électromagnétique venant de dehors et qui atteint la particule. La force électrique due à cette perturbation, en agissant sur la particule chargée, ou plutôt sur la charge de cette particule, donnera naissance à une force pondéromotrice agissant sur la particule en question.

Or cette particule étant supposée isolée il n'y aura pas de réaction : la force pondéromotrice ne sera pas contre-balancée.

Pour calculer la force mécanique résultante, Poincaré reprend simplement l'expression de la force pondéromotrice totale chez Lorentz. L'intégration étant prise sur tout l'espace, on a :

$$\mathbf{R} = \int \rho \mathbf{E} + \rho \mathbf{v} \wedge \mu_0 \mathbf{H} dV \quad (11.3)$$

Pour une particule isolée ρ vaut ρ_0 (densité de charge de la particule) sur le volume de la particule et 0 en dehors. Rappelons également les équations de Lorentz établies pour un corps au repos :

51. Poincaré 1901, p. 448.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}; \quad \nabla \wedge \mathbf{H} = \rho \mathbf{v} + \frac{\partial \epsilon_0 \mathbf{E}}{\partial t} \quad (11.4)$$

$$\nabla \cdot \mu_0 \mathbf{H} = 0; \quad \nabla \wedge \mathbf{E} = -\frac{\partial \mu_0 \mathbf{H}}{\partial t}$$

En tenant compte des équations 4.6 p. 116, et en posant $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$ on en déduit que :⁵²

$$\mathbf{R} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \frac{1}{c^2} \mathbf{E} \wedge \mathbf{H} dV \quad (11.5)$$

Cette expression, non nulle, violerait effectivement le principe de réaction d'après le raisonnement de Poincaré. Pour confirmer ses dires, il évoque les différentes tentatives faites pour rétablir la situation. Dans un premier temps, il reprend une hypothèse d'Alfred Liénard, qui avance en 1898 que le principe est vérifié car, à cause de la propagation de l'onde, il faut considérer la valeur moyenne de la résultante, prise entre l'instant initial et l'instant final de la perturbation, soit :⁵³

$$\frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_1}^{t_0} \mathbf{R} dt = \frac{1}{t_1 - t_0} \left[\int \frac{1}{c^2} \mathbf{E} \wedge \mathbf{H} dV \right]_{t_0}^{t_1}$$

Le terme dans les crochets restant fini (car l'intégrale ne diverge pas aux temps longs), si le temps t_1 tend vers l'infini, l'expression tend vers 0. Comme d'après Liénard « la résultante des forces est nulle en moyenne »,⁵⁴ le principe est vérifié. Mais Poincaré corrige le raisonnement de Liénard en montrant qu'un corps émettant une certaine quantité d'énergie électromagnétique dans une direction donnée subirait un recul, et aurait donc une impulsion finie, bien que la résultante des forces tende vers une valeur nulle aux temps longs. Il fait même le calcul, montrant que le recul pour une énergie de 3 mégajoules émise par un corps de 1 kg serait de 1 cm.s⁻¹.

L'autre possibilité évoquée par Poincaré est des plus intéressante. En effet, il nous dit qu'« on pourrait encore dire que si le principe de l'égalité de l'action et de la réaction semble violé, cela tient peut-être à ce qu'on n'a pas tenu compte du mouvement de l'éther ». En poursuivant son raisonnement, il considère que, si une vitesse était attribuée à l'éther, elle serait proportionnelle à la quantité $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$, et serait donc quadruplée si les forces (électrique

52. La démonstration consiste à établir un bilan énergétique en prenant le produit scalaire avec \mathbf{E} de l'équation avec $\nabla \wedge \mathbf{H}$ pour faire apparaître le flux d'énergie à travers la surface délimitant le volume où se trouvent les charges. Elle constitue aujourd'hui un calcul classique de l'enseignement supérieur. Voir l'annexe 12.2 pour la démonstration dans le cas général.

53. Voir Liénard 1898 (a).

54. Liénard 1898 (a), p. 457.

et magnétique) étaient doublées. Cette conclusion ne « satisfait pas » Poincaré. Or celui-ci touche ici du doigt la grande difficulté de raisonnement dans l'application du principe de réaction : le rôle de l'éther, sans limiter celui-ci à une simple fonction de référentiel absolu comme nous l'avons détaillé.

Un point important : Poincaré avance que la considération de l'éther dans le principe de réaction n'est pas satisfaisante chez Lorentz. Or, nous avons vu dans la première partie (voir page 108) que, chez Hertz, ce principe était violé si l'on ne l'appliquait qu'à la matière seule. Il semble donc nécessaire, pour vérifier le principe de réaction chez Hertz, de prendre en compte l'éther. En fait, cette différenciation entre matière et éther, si elle est justifiée chez Lorentz, n'a pas lieu d'être chez Hertz. D'une part, chez Hertz, tous les phénomènes électriques et magnétiques sont dus à l'éther, y compris la charge électrique. La matière ne vient que modifier localement les propriétés de celui-ci. D'autre part, comme l'éther est totalement entraîné par la matière, il est possible de considérer qu'éther et matière ne forment qu'un seul et même milieu. L'écriture du principe de réaction, chez Hertz, se fait donc naturellement dans ce milieu « éther + matière ». Lorsque Poincaré établit la vérification du principe de réaction chez Hertz, il n'écrit pas la résultante des forces pondéromotrices : il écrit un bilan d'énergie du champ.⁵⁵

Poincaré reprend le problème du principe de réaction dans un mémoire rédigé en 1900 à l'occasion du jubilé de Lorentz, célébrant ses 25 ans de carrière.⁵⁶ Ce mémoire, que nous n'avons pas inclus dans la liste des ouvrages de Poincaré au début de ce chapitre, n'est pas un support de diffusion auprès des ingénieurs : l'occasion de sa rédaction (un événement scientifique) et sa dimension de mémoire plus que de livre, ne permettent pas de le considérer comme tel. Néanmoins nous en discuterons certains points ici car Poincaré fait intervenir un raisonnement dû à Alfred Liénard, qui apparaît dans les articles que nous traiterons. Poincaré donne dans ce mémoire deux éléments qui importent : une description formelle de l'énergie électromagnétique, et une justification du principe de réaction.⁵⁷

L'énergie électromagnétique est considérée comme un fluide de densité proportionnelle à $E^2 + H^2$. On constate que si les forces sont doublées, c'est la densité de l'énergie électromagnétique qui varie, mais la vitesse de ce fluide reste constante, ce qui lève l'objection que

55. Poincaré 1901, p. 401.

56. Ce mémoire marque la contribution scientifique originale de Poincaré à la théorie de Lorentz de 1895. La demande de participer à ce jubilé avait été adressé par Heike Kammerling Onnes en septembre 1900 à Poincaré. Celui-ci répond positivement à l'invitation en disant avoir pensé à un sujet possible en octobre 1900. Il envoie son article de 26 pages un mois plus tard. Voir : Walter 2016.

57. Ce mémoire est également connu pour l'interprétation par Poincaré du temps local de Lorentz $t' = t - vx/c^2$ pour satisfaire au principe des états correspondants, que nous aborderons dans le chapitre suivant.

Poincaré formule dans son cours. Cette description en terme de fluide lui permet également de « diviser » l'énergie. Ainsi, il reprend l'exemple du « canon » émettant dans une direction donnée.⁵⁸ Dans la théorie de Hertz, nous dit-il, une fraction de l'énergie est rayonnée dans les diélectriques qui transmettent l'onde et vient contre-balancer l'impulsion du canon. Dans la théorie de Lorentz, comme il n'y a pas de diélectrique autre que le vide, cette compensation ne peut se faire. Sur la question des diélectriques, Poincaré montre d'ailleurs que le lien qui existe entre la théorie de Mossotti et celle de Maxwell, celui d'un passage à la limite en attribuant au vide une structure polarisable, est le même que celui entre Lorentz et Hertz.

Sur l'utilisation du principe de réaction, Poincaré amène la discussion sur la nécessité même de vérifier ou non ce principe. Il montre notamment que le principe de réaction découle du principe de relativité et de la conservation de l'énergie, mais seulement dans le cas d'un système isolé. Or, si chez Lorentz seule la matière porte la charge électrique, elle n'est pas la seule à contenir l'énergie, ce qui oblige à considérer également l'éther environnant lorsqu'on veut appliquer le principe de réaction à un système isolé. Poincaré aborde un dernier point : le principe de relativité est bien vérifié chez Lorentz, qui explique les résultats de certaines expériences (notamment les expériences optiques). Ce principe de relativité étant vérifié, le principe de réaction devrait suivre. Mais comme le souligne Poincaré, le principe de relativité n'est vérifié qu'approximativement, au premier ordre en u/c lorsque u est la vitesse de l'observateur.

Pour montrer cette incohérence, Poincaré raisonne sur l'émission d'un train d'ondes par un émetteur en mouvement à travers l'éther. L'énergie est mesurée par un observateur fixe dans l'éther, et un autre en mouvement. Supposons que l'émetteur se déplaçant à la vitesse v dans l'éther émette un train d'onde d'énergie J . Alors pour un observateur lié à l'éther, l'énergie totale correspond à celle du train d'onde plus celle pour compenser le recul, soit :⁵⁹

$$S = J - \frac{J}{c}v$$

On suppose ici que la vitesse de l'émetteur ne varie pas (en pratique il faut qu'il ait une masse suffisamment élevée).

Pour un observateur en mouvement à une vitesse u , l'énergie S reste la même car elle constitue l'énergie dépensée par l'émetteur (Poincaré suppose que le principe de conservation

58. Celui-ci est constitué d'un oscillateur hertzien placé au foyer d'un émetteur parabolique. Sa durée d'émission finie lui permet d'envoyer un train d'onde plane dans une direction bien définie. Sous l'effet de cette émission, le dispositif recule (conservation de la quantité de mouvement). La forme parabolique de l'émetteur vient de la propriété des miroirs paraboliques, tels que tout rayon passant par le foyer est renvoyé selon la direction parallèle à l'axe optique.

59. Les notations sont tirées de Darrigol 2000 (a).

de l'énergie est valable). Mais la vitesse relative étant différente, l'énergie apparente du train d'onde est J' telle que :

$$S = J' - \frac{J'}{c}(v - u)$$

L'expression de J' en fonction de J se retrouve en prenant $v = 0$. On obtient pour l'observateur en mouvement (au premier ordre en u/c) un bilan :⁶⁰

$$S = J \left(1 - \frac{v}{c}\right) + \frac{Ju}{c^2}v$$

Ce bilan diffère de celui de l'observateur fixe par le terme $\frac{Ju}{c^2}v$. Poincaré en déduit que le principe de réaction est violé si on l'applique à la matière seule, de même que le principe de relativité. Il constate que la mise en évidence de ce terme supplémentaire est cependant particulièrement difficile, la force étant d'après un calcul de Liénard très faible. Nous verrons plus loin comment Liénard est arrivé aux mêmes conclusions.

La mise en évidence de cette énergie complémentaire dans le référentiel en mouvement n'est pas le point essentiel de cette réflexion de Poincaré. Il se contente de montrer qu'il y a une incohérence dans l'application de la mécanique à la théorie de Lorentz, et il relie à ce raisonnement énergétique une force que Liénard a mise en évidence dans un article de 1898.⁶¹ Plus important, au cours de cette démonstration, Poincaré attribue aux champs électrique et magnétique une densité de quantité de mouvement.⁶² La force complémentaire sert alors à équilibrer le bilan de quantité de mouvement pour un excitateur rayonnant de l'énergie. Nous avons vu dans les chapitres précédents que les champs \mathbf{E} et \mathbf{B} possédaient déjà toutes les propriétés mathématiques. En attribuant cette quantité de mouvement aux champs, Poincaré leur donne les propriétés physiques. Chez Lorentz, l'éther n'est déjà plus qu'un référentiel absolu, par rapport auquel lequel les phénomènes électriques se transmettent. Avec Poincaré, une dynamique des champs se met en place, l'éther devient superflu.

60. Notons que les deux vitesses u et v sont petites devant c mais la vitesse de l'émetteur v peut être bien plus grande que celle de l'observateur en mouvement u .

61. Liénard 1898 (c).

62. Pour illustrer son propos Poincaré passe par l'intermédiaire d'un fluide fictif, dont la densité volumique serait la densité d'énergie volumique d'énergie électromagnétique. Voir Darrigol 2000 (a). Pour Poincaré, cette densité de quantité de mouvement est purement formelle, tout comme le fluide auquel elle se rattache.

Conclusion

Au travers de ses différents ouvrages sur la théorie de Maxwell, Poincaré étale tous ses talents d'enseignant. Du cours magistral à la Sorbonne, premier cours publié sur la théorie de Maxwell, à l'ouvrage de vulgarisation ne contenant aucune équation, le fossé est large mais Poincaré passe de l'un à l'autre de manière magistrale. Ainsi, il développe tous les concepts relatifs à Maxwell, en utilisant les mathématiques ou les analogies selon son lectorat, excepté dans de rares cas trop subtils comme la distinction entre « électricité » et « fluide inducteur ».

L'apparition des théories nouvelles de Hertz et Lorentz à partir des années 1890 représente un large terrain de jeu pour Poincaré, qui se complaît à mettre en parallèle les deux conceptions. Et cette image de terrain de jeu n'est pas anodine : car Poincaré reformule, compare, illustre, pointe les avantages comme les inconvénients, mais ne fait qu'emprunter ces théories, qu'il ne considère jamais comme siennes. Poincaré ne cherche pas — du moins d'après ses dires — à apporter sa propre contribution aux concepts, celle-ci réside dans ce qu'il a mis en lumière des différentes théories. Ainsi, Hertz, Lorentz, ou Liénard, ont tous fait quelque chose, que Poincaré met en perspective, et parfois en conformité avec les principes fondamentaux servant pour lui de base à la physique.

Et lorsque Poincaré propose une approche particulière pour tenter d'expliquer un problème, comme il le fait avec sa description du champ électromagnétique en termes de fluide fictif, ses conclusions sont souvent justes. Dans une lettre qu'il adresse à Lorentz pour le remercier de son mémoire de 1900 (participation au jubilé), Lorentz lui précise l'une des conclusions auxquelles il est lui-même arrivé : un éther immobile. « Or, nous dit-il, si un corps ne se déplace jamais, il n'y a aucune raison pour laquelle on parlerait de forces exercées sur ce corps. C'est ainsi que j'ai été amené à ne plus parler de forces qui agissent sur l'éther. Je dis que l'éther agit sur les électrons, mais je ne dis pas qu'il éprouve de leur côté (*sic*) une réaction ; je nie donc le principe de la réaction dans ces actions élémentaires. [...] Il me semble qu'on pourrait se borner à considérer $\int \mathbf{E} \wedge \mathbf{B}$ comme [une quantité dépendante] de l'état de l'éther qui [est] pour ainsi dire « [équivalente] » à une quantité de mouvement. ». ⁶³ Cette quantité de mouvement, dont parle Poincaré dans son mémoire, est désormais une quantité de mouvement du champ et non plus de l'éther.

63. Walter 2007, p. 253. Les guillemets sont de Lorentz.

Chapitre 12

Alfred Liénard et sa contribution à l'électromagnétisme

Les différents domaines que nous avons abordés au cours de ce travail se retrouvent à travers un personnage : celui d'Alfred Liénard (1869-1958). La synthèse est parfaite : formé à l'École Polytechnique et aux Mines, enseignant l'électricité et la physique, remplissant des fonctions d'ingénieur, et publiant dans des journaux spécifiques des articles de diffusion autant que de recherche. Notons que ce parcours n'a rien d'atypique, mais contrairement à ses collègues, Liénard remplit tous les aspects qui nous intéressent.

La première partie donne une biographie de Liénard, s'attardant sur ses premières années, notamment sa formation et son poste à l'École des Mines de Saint-Étienne. Elle reflète la situation ambivalente d'un ingénieur de l'État éloigné des cercles académiques parisiens, et parfois amené à choisir entre la physique et l'électricité. La seconde partie propose un commentaire critique des différentes publications de Liénard sur la période 1890-1900, publications qui sont pour la plupart regroupées au sein du journal *L'Éclairage Électrique*. C'est d'ailleurs grâce à l'une d'elles que Liénard passera à la postérité, avec les potentiels éponymes.

12.1 Biographie

Alfred Liénard présente le profil type de l'ingénieur des corps de l'État. Passé par Polytechnique et l'École des Mines de Paris, il poursuit une carrière en tant qu'ingénieur de l'État, et comme enseignant au sein de l'École des Mines de Saint-Étienne, puis de Paris, dont il prendra la direction dans les années 1920.

Naissance et études

Alfred Marie Liénard est né à Amiens le 2 avril 1869. Il est le fils de Charles Fréjus Désiré Liénard, ingénieur des Mines, directeur éphémère de ce qui était encore l'École des Mineurs de Saint-Étienne (1880-1881) et de la mine de Carmaux à partir de 1881, et d'Amélie Élixa Alexandrine Heysh. Alfred entre à l'École Polytechnique en 1887 avec des résultats presque excellents :¹ à l'écrit, il obtient les notes de 16 en Mathématiques, 17 en Géométrie descriptive, 19 en Calcul trigonométrique, 10 en Français, 13 en Dessin et 14 en Allemand. Il s'en sort au moins aussi bien à l'oral avec des notes de 19 et 17 sur les deux épreuves de mathématiques. En fait, ses moins bons résultats sont... en Physique-Chimie, où il n'obtient « que » 10 à l'écrit et 14 à l'oral. Il finit néanmoins classé au 5^e rang des admis (sur 222). Sa très bonne scolarité confirme les capacités entrevues au concours, Alfred figurant régulièrement dans les trois premiers élèves de la promotion aux examens de passage. Il sort 3^e de l'école en 1889.² Il intègre ensuite l'École des Mines de Paris, où il obtient les meilleurs résultats des quatre élèves issus de Polytechnique. Il en sort 1^{er} en 1892.³

Carrière

À sa sortie de l'École, Liénard effectue une année de service militaire à Valence. Il est alors ingénieur des chemins de fer sur la ligne Paris-Méditerranée.⁴ De 1893 à 1895, il est muté à Marseille puis à Angers, où il travaille au « département minéralogique ». Après avoir obtenu deux licences ès mathématiques et ès sciences physiques, il est nommé à partir du 1^{er} septembre 1895 à l'école des Mines de Saint-Étienne en qualité de professeur des cours de mécanique appliquée, de constructions (en particulier l'électricité industrielle) et de chemins de fer. Liénard exerce également des missions de conseil dans un cadre privé. Il étudie par exemple en avril 1899 un gisement dans la région de Marjevols pour un particulier. Après une première demande en 1899 (voir plus loin), il obtient finalement en septembre 1908 sa

1. Son frère, Charles Hippolyte Antonin Liénard, l'y avait précédé (X 1885, ingénieur de l'artillerie).

2. École Polytechnique 1889. Liénard est précédé d'Eugène Verlant (1^{er}) et Eugène Herscher (2^e). Verlant est resté célèbre pour ses travaux d'unification des signaux ferroviaires (le « Code Verlant ») et routiers (trichromisme des feux routiers). Sur ce point voir : Kaufmann et Montulet 2004, p. 106. Herscher enseignera notamment au sein de l'Institut industriel du Nord de 1897 à 1902.

3. Liénard 1892. Le « Voyage d'instruction » de troisième année ayant été annulé par décision ministérielle pour une raison inconnue, le bulletin de Liénard porte la mention « déclaré hors-concours », signifiant qu'il est diplômé sans avoir officiellement rempli tous les attendus.

4. Plus précisément « chargé du 9^e arrondissement du contrôle de l'exploitation technique des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée », lettre du 12 octobre 1892.

mutation à Paris.⁵ Il est élu titulaire de la chaire d'Électricité à l'École des Mines peu après son arrivée.⁶ À partir de 1912, Liénard prend également en charge le cours de construction et de résistance des matériaux.

Pendant la Première Guerre Mondiale, Liénard sert comme lieutenant-colonel d'artillerie. En décembre 1918, il est nommé sous-directeur de l'École des Mines de Paris, en remplacement de Gabriel Chesneau, qui passe directeur. Le décret de nomination de Liénard est d'ailleurs signé par Raymond Poincaré — le cousin d'Henri — alors président de la République. Dix ans plus tard, Liénard est à son tour nommé directeur de l'école. Dans le cadre de ses fonctions, il officie au Conseil National des Recherches Scientifiques et des Inventions à partir de 1932, et est présent au conseil de perfectionnement de l'École Polytechnique. De 1926 à 1929, il occupe également le poste de vice-directeur de la Société Française des Électriciens, et devient directeur de la Société Mathématique de France en 1933. Cette même année il obtient également le grade de commandeur de la Légion d'Honneur. Il décède le 29 avril 1958 à la clinique Turin (Paris 8e).⁷

L'École des Mines de Saint-Étienne

L'école au sein de laquelle Liénard débute sa carrière a un statut assez particulier vis-à-vis des grandes institutions de l'État, et une proximité assumée avec le milieu industriel. Dans son livre sur l'École des Mines de Saint-Étienne,⁸ l'historienne des techniques Anne-Françoise Garçon décrit en détail les enjeux de sa création. L'école naît en août 1816, après des premières tentatives éphémères à Pesey (massif de la Tarentaise, dans les Alpes) et Geislautern (dans la Sarre) faites dans le contexte impérial. D'après l'ordonnance de sa création, l'École des Mineurs de Saint-Étienne se situe dans la droite ligne de ces dernières, avec pour mission de les remplacer. Las, en décembre 1816, quelques mois après sa création, une seconde ordonnance fait revivre l'École des Mines de Paris « créée par l'arrêt du Conseil du Roi du 19 mars 1783 »

5. *JO* 17 septembre 1908, p. 6462. Liénard est officiellement muté à « l'arrondissement minéralogique de Versailles », qui est en pratique l'arrondissement minéralogique de Paris.

6. Liénard 1908. Liénard était d'ailleurs le seul candidat pour ce poste. Le règlement de l'école nécessitant au moins deux candidats, M. Schlumberger, déjà professeur de physique, a été ajouté en deuxième ligne pour « faire le compte ».

7. Liénard 1908 ; Base Léonore, dossier 19800035/177/22888. L'acte de décès de Liénard comporte d'ailleurs une erreur sur la date de naissance, il s'agit bien du 2 avril 1869 et non du 22 avril comme mentionné. Il est plaisant de remarquer qu'au moment de son décès Liénard résidait 23 rue de l'Amiral Mouchez (Paris 13e), ancien directeur de l'Observatoire.

8. Voir Garçon 2004. Les références sont données pour la version en ligne : <https://books.openedition.org/pur/17502>.

datant de la période pré-Napoléon. À partir de 1816, Saint-Étienne doit donc cohabiter avec son encombrante aïeule.

La renaissance de l'école de Paris *ex nihilo* est cependant à nuancer, comme le souligne Anne-Françoise Garçon :⁹

L'École des Mines de Paris dans sa version moderne naquit à Pesey, ce que le Corps des Mines n'a pas semblé devoir admettre. [...] L'École pratique du Mont-Blanc [de Pesey] a été le premier établissement officiellement et durablement consacré à la formation d'ingénieur et d'entrepreneur des mines et de la métallurgie. [...] Saint-Étienne par contre, naquit à Geislautern. L'école sarroise fut le berceau de l'école stéphanoise. La tentative en Sarre fut brève, éphémère même à l'échelle des temps, puisqu'elle dura guère plus de sept années, de 1807 à 1815, contre une décennie, de 1802 à 1814, pour l'école du Mont-Blanc.

Le choix de Saint-Étienne n'est évidemment pas dû au hasard. La région constitue un bassin houiller et industriel. L'objectif est de fonder « une école pratique des mineurs ». ¹⁰ Mais quelle place pour les nouveaux venus au sein du corps des Mines ? Le premier directeur de l'école stéphanoise, Louis-Antoine Beaunier, insiste pour se démarquer suffisamment de l'école parisienne. Cette « école pratique » doit avoir pour but de former des directeurs d'exploitation, bien différents dans leurs fonctions et leur formation que les ingénieurs du Corps. Beaunier décrit Paris comme « une école de théorie », nécessitant notamment un « enseignement préliminaire ». Enseignement, nous dit-il, « que possède bien rarement celui qui se destine à la direction de tel ou tel établissement particulier, encore moins à la direction d'un simple atelier ». ¹¹

À la fin du XIXe siècle, Saint-Étienne cherche toujours à affirmer son indépendance face aux écoles parisiennes, non seulement les Mines mais également Polytechnique. En 1882, elle quitte la dénomination « École des Mineurs » pour devenir officiellement « École des Mines ». La précision « de Saint-Étienne » ne restera pas longtemps utile. En 1883, Paris devient alors « École supérieure des Mines de Paris ». Garçon pose la question de savoir à quoi renvoie ce qualificatif de « supérieure », en avançant l'idée d'une supériorité scientifique assumée dans le milieu parisien. La question du diplôme ne reste pas non plus sans heurts. Ce n'est qu'à partir

9. Garçon 2004, chap. 2 § 2.

10. *Ibid.*, § 40.

11. Garçon 2004 § 45. Les citations sont de Beaunier. Ce dernier utilise notamment la comparaison avec les établissements allemands, rapprochant l'école de Paris d'une *Bergakademie*, professant une formation théorique, et regrettant l'absence d'une *Bergschule*, plus orientée vers la pratique.

de 1887 que l'administration accorde à l'école de Saint-Étienne la possibilité de décerner un diplôme officiel en lieu et place des trois classes de brevets jusque-là établies. La mention officielle du premier diplôme, « diplôme supérieur d'anciens élèves de l'École des Mines de Saint-Étienne aptes à exercer les fonctions d'ingénieur », est largement contestée par l'amicale des anciens élèves. En 1891, la mention définitive est fixée à « École des Mines de Saint-Étienne. Diplôme d'Ingénieur civil des Mines », une fois encore au grand dam des anciens qui regrettent que la pluralité des formations de l'école ne soit pas représentée par le titre « d'ingénieur civil » et auraient préféré un diplôme d'école, comme pour l'école Centrale.¹²

La rivalité entre Paris et Saint-Étienne ne s'arrête pas au nom ou au diplôme. En plus de l'objectif d'assurer une formation spécifique, le recrutement se veut également indépendant des écoles parisiennes, en particulier de la principale d'entre elles, Polytechnique :¹³

Les ingénieurs-recruteurs restaient dans cette ligne qui les avait conduits à interdire progressivement l'accès de l'école aux élèves admissibles à Polytechnique, au nom d'un argument qui, là encore, avait fait l'unanimité, savoir que l'école des mines n'avait pas vocation à servir de rebut, de pis-aller pour les candidats ayant raté le concours d'entrée ; elle n'avait pas vocation à recevoir les élèves qui n'avaient pas réussi à intégrer les grandes écoles parisiennes. C'était inclus dans l'adage : qui prépare Saint-Étienne ne saurait préparer Polytechnique. Les années passant en effet, les précautions s'étaient multipliées pour éviter qu'il en fût autrement. Il y eut d'abord le programme d'admission, devenu tout à fait spécifique à Saint-Étienne, au point de réclamer des connaissances en physique et chimie supérieures à celles demandées pour le concours d'entrée à l'École Polytechnique. Ensuite, le conseil de l'École s'arrangea pour que les dates des oraux d'admission à Saint-Étienne coïncident avec ceux de Polytechnique et que cela décourage les étudiants de passer les deux épreuves. Puis, pour creuser davantage l'écart, à partir de 1890, le « concours d'octobre », ce concours supplémentaire à l'intention des candidats à Polytechnique désireux malgré tout de se présenter à Saint-Étienne, fut supprimé.

12. *Ibid.*, chap. 9 : § 9 pour le changement de nom. Voir aussi note 4. Le changement de nom fut également introduit pour marquer une différence par rapport aux écoles d'Alès et Douai nouvellement créées. Voir § 34-35-36 pour la question du diplôme.

13. *Ibid.*, chap. 10 § 25. La coïncidence des dates d'oraux, même approximative, est une contrainte forte étant donnée la longueur du trajet entre Paris (pour les épreuves de Polytechnique) et Saint-Étienne.

Enfin, les élèves sortant de Polytechnique que l'école était tenue d'accepter en deuxième année conformément à ses statuts, furent mis dans l'obligation de subir avec succès un examen portant sur le programme de la première année stéphanoise : analyse minérale, lever de plans, etc., à l'exception de la minéralogie. Sur ce point aussi, il y avait consensus entre les ingénieurs du Corps et les ingénieurs civils : ni les uns ni les autres ne voulaient faire de Saint-Étienne une sous-école d'application de Polytechnique.

Le choix est donc très clair du côté de la Loire, avec un statut de grande école de province à assumer. En particulier, le refus de considérer l'école comme une école d'application de Polytechnique apparaît comme un point fondamental pour se différencier de sa grande sœur parisienne.

Plusieurs voies sont possibles pour intégrer l'école. La plus courante est l'obtention du baccalauréat ès sciences puis la préparation de l'école au sein d'une des classes préparatoires de Saint-Étienne : Valbenoite, le pensionnat Saint-Louis, et le Lycée.¹⁴ À défaut, il est possible de la préparer dans un établissement d'un autre département. La deuxième filière est l'enseignement spécial secondaire et la préparation dans l'un des établissements de Saint-Étienne. La dernière possibilité est de sortir de l'enseignement primaire supérieur et de préparer à Saint-Étienne. La préparation est dans ce cas en trois ans et se fait principalement à Saint-Louis. Comme le signale Garçon, « dans tous les cas, obtenir le diplôme d'ingénieur civil des mines, signifiait passer entre cinq à six années d'études à Saint-Étienne, dont deux à trois en internat dans les classes préparatoires, suivis des trois années d'externat à l'école. Financer de telles études supposait à tout le moins un solide niveau d'aisance ».¹⁵

Cette exigence pose nécessairement des conditions sur le niveau social des prétendants à l'école. Et sur ce point, Saint-Étienne ne se démarque pas tellement des grandes écoles parisiennes. D'après l'étude faite par Anne-Françoise Garçon sur le statut social des pères des candidats et élèves de l'école, la répartition est la suivante : « 33 % des pères appartiennent à la haute bourgeoisie (rentiers et propriétaires, professions libérales, hauts fonctionnaires et officiers, industriels et négociants), 23 % à la moyenne bourgeoisie (employés et cadres inférieurs, sans qu'il ait été possible de discerner ce qui relevait de la fonction publique et ce qui n'en relevait pas), 20,5 % à la petite bourgeoisie (artisans et boutiquiers), 15,5 % aux « classes populaires » (paysans et ouvriers) ».¹⁶ Cette répartition place Saint-Étienne sur le

14. Ce constat est valable avant 1890, et l'existence du baccalauréat ès sciences. Après 1890, aucune précision n'a été trouvée, on peut supposer que seule la première partie du baccalauréat classique est nécessaire.

15. *Ibid.*, chap. 10, § 34.

16. *Ibid.*, § 36. L'auteur signale que cette étude est surtout une approximation, les statistiques réalisées

même profil que les écoles des Arts et Métiers, avec respectivement 43,5 et 37 % des candidats et élèves de la petite et moyenne bourgeoisie. Néanmoins, Saint-Étienne a une tendance plus forte vers le groupe de la haute bourgeoisie, avec 33% des candidats et élèves, alors que les Arts et Métiers ont 31% appartenant à la classe populaire (ce qui illustre le recrutement majoritaire de ces écoles dans le secteur primaire). Sans surprise, les deux grandes écoles parisiennes Polytechnique et Centrale sont plus huppées avec 59% dans les deux cas appartenant à la haute bourgeoisie. Que ce soit au niveau de la formation et de l'objectif que sur celui du recrutement, Saint-Étienne se positionne ainsi comme grande école de province.

Le cours de Saint-Étienne

Dans le cadre de ses fonctions à l'École des Mines de Saint-Étienne, Liénard enseigne en particulier l'électricité industrielle. Il publie ce cours en 1904.¹⁷ La bibliographie et la table des matières sont données en annexe (voir Annexe n° 13). La bibliographie donne une étrange impression de déjà-vu et regroupe beaucoup de points déjà évoqués : les six premiers auteurs cités sont Maxwell, Brunhes, Gérard, Aubusson de Cavarlay, Potier et Janet.¹⁸ À la liste des auteurs (21 au total) s'ajoutent également les « Notes de cours de l'École Supérieure d'Électricité », le *Bulletin de la SIE*, et les journaux *L'Électricien* et *L'Éclairage Électrique*.

La table des matières est caractéristique des cours d'électricité industrielle, avec une première partie (sur laquelle nous reviendrons) reprenant les bases de l'électricité théorique, puis des parties articulées autour des grands domaines d'applications. La deuxième partie aborde ainsi les « mesures électriques et magnétiques », avec l'utilisation des appareils (voltmètres, ampèremètres, ...), les méthodes et les circuits, en particulier pour les mesures de résistance (pont de Wheastone) et de différence de potentiel, puis les mesures d'intensité magnétique. La troisième partie est dédiée aux machines dynamos à courant continu, avec une description complète des composants des machines : induit, inducteur, balais, etc. et les essais de fonctionnement. La quatrième partie est, de manière semblable, centrée sur les machines à courants alternatifs (moteurs synchrones, asynchrones), le *compoundage* (excitation extérieure) du dispositif et la transformation des courants alternatifs. La dernière partie traite de la distribution et autres applications de l'électricité : éclairage, métallurgie, traction ferroviaire, téléphonie, etc.

par l'école ne portant que sur quatre années.

17. Liénard 1904.

18. Voir l'annexe pour les références complètes. Liénard ne donne pas de référence pour le cours de Potier aux Mines, il s'agit probablement du cours qu'il y a lui-même suivi en tant qu'élève.

Concernant la première partie, Liénard y rappelle les lois principales de l'électricité et de l'électromagnétisme : lois statiques, dynamiques, principes de la pile, lois régissant les courants, induction, aimantation. Il justifie d'ailleurs cette partie en mettant en avant le rôle de la théorie dans l'évolution des techniques :¹⁹

Il est peu de sciences d'application où l'on ait aussi souvent recours à la théorie pure que l'électricité industrielle, et il n'est que juste de reconnaître que le développement si rapide des applications de l'électricité depuis quelque trente-quarante ans n'a été rendu possible que par les progrès dans les études théoriques. Ainsi, tout cours d'électricité industrielle doit-il forcément débiter par une révision des lois et théories de l'électricité et du magnétisme, en insistant principalement sur les points qui intéressent particulièrement les applications comme les piles réversibles ou accumulateurs, la théorie du circuit magnétique, celle des courants alternatifs, etc.

Point intéressant, et souvent peu présent dans les cours d'électricité appliquée, Liénard poursuit en expliquant que le principe de toute machine électrique est de transformer une forme d'énergie en une autre :²⁰

Les applications industrielles ne sont pas seulement usage des théories particulières à l'électricité ; elles utilisent un principe plus général qui domine toute la physique : c'est le principe de la conservation de l'énergie.

Comme pouvait le laisser prévoir sa formation de polytechnicien, Liénard attache une grande importance à la théorie. Sa première partie s'intitule d'ailleurs « Résumé du cours d'électricité théorique et compléments ». Mais à quel cours Liénard fait-il référence ? Il ne mentionne aucune date, ni aucun établissement où il aurait pu l'enseigner. Il est donc possible qu'il ne désigne pas un cours en particulier, mais plutôt un ensemble de notions se rapportant à la théorie. Polytechnique ne dispose d'ailleurs pas d'un cours officiel d'électricité, même si la plupart des notions que Liénard aborde dans cette première partie y sont enseignées. L'électromagnétisme de Maxwell, également enseigné à Polytechnique, reste en dehors de ce cadre « appliqué ». Un élément jette néanmoins le trouble sur cette fameuse « électricité théorique ».

19. Liénard 1904, p. 1.

20. *Ibid.* Cet aspect va dans le sens de l'avis de William Preece, qui considérait que la vision de l'électricité comme une énergie était surtout celle des ingénieurs (voir 9.2 et Annexe n° 10). Soulignons que Liénard est également un physicien s'intéressant aux problèmes théoriques.

L'affaire du cours de Lyon

En 1896, alors qu'il est en poste depuis peu à Saint-Étienne, Liénard reçoit une proposition de la Faculté des sciences de Lyon pour donner un « cours libre de physique mathématique » à partir du 1^{er} novembre de cette même année (jusqu'en avril environ), à raison d'une heure par semaine, et sans rémunération officielle (il recevra après coup une gratification). Il reçoit l'autorisation de cumul du ministre. Au sein de la faculté de Lyon, ce cours est évoqué au conseil lors de séances en juillet 1896. Liénard donne cet enseignement pendant deux années, sans qu'aucune remarque ne soit faite à la faculté de Lyon ou aux Mines de Saint-Étienne.

Ce cours ressort en octobre 1899 lors d'un conseil d'administration de l'École des Mines de Saint-Étienne dont l'objet est d'évaluer la demande de mutation de Liénard pour Paris. Ce dernier argue du fait qu'il enseigne depuis le début de son poste le cours d'électricité industrielle à l'école, qu'il a déjà publié plusieurs travaux sur le sujet (il s'agit des articles dans le journal *La Lumière Électrique/L'Éclairage Électrique*, voir plus loin) et que, souhaitant tenter d'obtenir la chaire d'Électricité de l'École des Mines de Paris, il pense pouvoir s'y préparer mieux en accédant au laboratoire d'électricité nouvellement ouvert (il s'agit du Laboratoire Central d'Électricité, rue de Stael).²¹ Outre les cours donnés à Saint-Étienne, Liénard présente le cours donné à Lyon comme un « cours libre d'électricité théorique », alors qu'il s'agissait officiellement d'un cours de physique mathématique.

À Lyon, la dénomination de ce cours ne varie pas : il s'agit bien d'un cours libre de physique mathématique. La distinction est importante, car au même moment la question d'un cours d'« électricité industrielle » se pose à la faculté. Dès juin 1896, la création d'un cours de physique appliquée à l'industrie est évoquée en conseil d'administration. Sont mis en avant « les avantages que présenterait cette création pour la ville de Lyon. Les ingénieurs, les contre-maîtres, les industriels, seraient certainement appelés à en retirer beaucoup de profit »,²² dans une région qui a déjà vu naître le cours d'électricité de Paul Janet à Grenoble. Cette idée fait toutefois face à quelques réticences, notamment de la part de Louis Gouy, professeur de physique de la faculté, qui demande la mise en place d'un programme précis.²³ En novembre 1896 (alors que Liénard avait déjà commencé son enseignement de physique mathématique),

21. Le directeur de l'école M. Tauzin s'opposera finalement à la demande de mutation, faisant valoir le fait que les instruments dont dispose Liénard à Saint-Étienne sont d'une qualité suffisante, et que le faible nombre d'enseignants ne permet pas d'accepter certains départs. Il transmettra un avis défavorable au ministre.

22. Faculté des sciences de Lyon 1896.

23. Louis Georges Gouy (1854-1926) physicien ayant travaillé notamment sur l'optique et l'électrostatique. Il a donné son nom à la phase de Gouy, représentant l'avance de phase d'une onde au passage d'un foyer, ainsi qu'à la balance de Gouy utilisée pour mesurer la susceptibilité magnétique d'un liquide.

cette question est à nouveau débattue, avec une demande d'un cours d'électricité industrielle. Ce cours ne sera finalement mis en place qu'en janvier 1898 sous l'égide de Henri Rigollot, ancien élève de l'École Centrale de Lyon.

Quelle était donc la place de l'électricité dans ce cours de physique de Liénard à Lyon ? Et surtout, que Liénard désigne-t-il par « électricité » ? Il est probable que Liénard, étant donné son champ de compétence, ait accordé une large part du cours à l'électromagnétisme. Il est même possible qu'il ait choisi, à l'image d'un Poincaré, d'aborder dans un cours de physique mathématique un seul et même sujet sur l'année, qui serait centré sur les théories de l'électromagnétisme. Mais ces dernières étaient enseignées dans des cours de physique, et elles différaient largement des cours d'électricité. La table des matières du cours à Saint-Étienne l'illustre bien, avec une totale absence des théories électromagnétiques « récentes » — depuis Maxwell — dans la première partie théorique. Il n'est donc pas habituel qu'un cours sur les théories électromagnétiques soit considéré comme de « l'électricité », qui utilise avant tout les notions d'électrocinétique comme la tension ou l'intensité, et les lois afférentes.²⁴

En février 1900, quelques mois après ce conseil d'école aux Mines où il présente ce cours comme un cours d'électricité théorique, Liénard postule à un poste de répétiteur à Polytechnique. Il s'agit d'un poste de répétiteur auxiliaire de physique, laissé vacant par Aimé Vaschy — que nous avons déjà rencontré à l'École Supérieure de Télégraphie. Dans la lettre de candidature qu'il adresse au général directeur de l'école, Liénard met en avant ses états de service en tant qu'ingénieur des Mines, ainsi que son goût pour « les études purement scientifiques », notamment l'obtention des licences de mathématique et de physique, et la publication de plusieurs articles théoriques. Lorsqu'il évoque le cours donné à Lyon, il mentionne un cours libre... de physique mathématique ! Il précise également qu'il a uniquement abordé l'électricité et l'optique.²⁵

En postulant à une chaire d'électricité, Liénard parle d'un cours libre d'électricité théorique et, quelques mois plus tard, il évoque un cours libre de physique mathématique lors d'une candidature à un poste de répétiteur de physique. Aucune trace du contenu de ce cours n'ayant été retrouvée, il est impossible de tirer un jugement définitif. Mais on ne peut exclure que Liénard ait plus ou moins adapté le caractère « libre » de son cours à l'énoncé même, selon ses objectifs. L'hypothèse la plus probable est qu'il ait enseigné — comme Poincaré à la Sorbonne — les théories électromagnétiques et optiques, par exemple réparties sur les

24. Cette distinction entre électromagnétisme (et optique ondulatoire) d'un côté et électricité de l'autre est d'ailleurs toujours faite dans l'enseignement supérieur actuel.

25. Liénard 1900. Lorsqu'il mentionne ses licences, Liénard les évoque juste avant son poste à Saint-Étienne, on peut supposer qu'il les a obtenues à Angers ou Marseille.

deux années de son cours à Lyon. Ces enseignements se retrouveraient dans les publications de 1898, dans lesquelles il aborde les nouvelles théories électromagnétiques. Lorsqu'il postule à la chaire d'électricité, Liénard fait passer ces leçons sur l'électromagnétisme pour des cours d'électricité en considérant que c'en était une approche théorique.

Cette mise en relation est bien évidemment possible, notamment avec la théorie de Lorentz qui donne une vision simple de la charge électrique se déplaçant sur des particules de matière. Mais dans la nomenclature de l'époque ce rapprochement nous semble particulièrement étonnant. Nous pouvons reprendre l'exemple de Paul Janet, directeur de l'École Supérieure d'Électricité, qui dans son programme d'enseignement de 1904 (voir 8.3 p. 254) considère que « le mot *théorique* peut avoir bien des sens différents, et il est clair, par exemple, qu'on ne l'entend pas de la même façon lorsqu'on l'applique à la théorie des électrons ou à la théorie de la machine dynamo-électrique ». Liénard a probablement joué du sens à attribuer à ce mot de « théorie » pour rapprocher ses enseignements en électromagnétisme de l'électricité.

Quoiqu'il en soit, ses demandes n'aboutiront pas : sa mutation aux Mines de Paris est refusée par le ministre, qui lui propose de « représenter sa demande en temps opportun » ;²⁶ de même, le poste de répétiteur de physique auxiliaire à Polytechnique est attribué à un autre personnage déjà évoqué, Pierre Curie.²⁷ Liénard obtiendra finalement un poste aux Mines de Paris en 1908 avec la chaire d'électricité, ainsi que le poste de répétiteur de mécanique à Polytechnique à partir de 1913.²⁸

12.2 Publications théoriques

Les premières publications de Liénard, sur la période 1890-1900, sont caractéristiques des différentes facettes du personnage. Mises à part deux notes à l'Académie des Sciences qui se trouvent dans les *Comptes Rendus*, les publications sont toutes dans le journal *L'Éclairage Électrique*. Comme nous l'avons déjà évoqué, la présence d'Henri Poincaré, ancien polytechnicien passé par les Mines (comme Liénard), et des professeurs de l'X Cornu et Potier au sein de la direction scientifique n'y est probablement pas étrangère : Liénard, loin de la capitale et de ses cercles scientifiques, dispose d'un moyen tout trouvé pour publier ses articles. Nous proposons d'en faire ici un commentaire détaillé, commentaire linéaire suivant la démarche de Liénard. S'il évoque l'éther à plusieurs reprises, ces articles sont surtout des illustrations de deux points de notre démarche : ce qu'un ingénieur académique de (très) bon niveau peut

26. École des Mines de Saint-Étienne 1901.

27. École Polytechnique 1929.

28. Répétiteur adjoint, puis titulaire à partir de 1920.

produire sur les théories électromagnétiques, et un moyen de diffusion pour ces travaux.²⁹

« Pressions à l'intérieur des aimants et des diélectriques » (*LE, LII, 1894, pp. 7-11 ; 67-73*)

Le premier article de Liénard paraît en 1894 dans la *Lumière Électrique*, peu avant que le journal ne change de nom. Liénard s'intéresse aux pressions à l'intérieur des corps polarisés, dans le cas magnétique (aimants) ou électrique (diélectriques). Comme il le souligne au début de son article, les travaux sur ce sujet sont alors nombreux, et les résultats qu'il obtient sur les aimants l'amènent notamment à corriger Maxwell et Duhem sur leurs travaux respectifs.

Liénard commence par établir un lemme : soit un espace C (comme un corps matériel) et deux fonctions Φ et Φ' continues et uniformes, dérivables deux fois. Φ est définie à l'intérieur de l'espace C , Φ' est définie à l'extérieur, c'est une fonction harmonique qui s'annule à l'infini. En tout point de la surface S du corps C les deux fonctions Φ et Φ' sont égales. La normale extérieure à la surface est notée \mathbf{n} . Liénard donne la relation :

$$\iint_S \frac{1}{2} [\nabla\Phi + \nabla\Phi'] \nabla(\Phi' - \Phi) \cdot \mathbf{n} dS + \iiint_C \Delta\Phi \nabla\Phi dV = 0 \quad (12.1)$$

Il applique ce lemme aux fonctions potentielles (potentiel électrique ou potentiel magnétique), qu'il utilise beaucoup pour les corps polarisés. Dans ce cas, l'espace C représente le corps en lui-même, et les fonctions Φ et Φ' respectivement le potentiel à l'intérieur et à l'extérieur.³⁰

Liénard définit ainsi l'énergie potentielle d'un aimant C (noté indice 1) placé dans un potentiel extérieur Φ_2 :³¹

$$Y = \iiint_C \mathbf{M}_1 \cdot (\nabla\Phi_2) dV \quad (12.2)$$

où \mathbf{M}_1 est l'aimantation du corps C . Il en déduit la force et le couple en écrivant que le travail vaut $-dY$, soit $\mathbf{F} = -(\mathbf{M}_1 \cdot \nabla)(\nabla\Phi_2)$ et $\mathbf{C} = -\mathbf{M}_1 \wedge (\nabla\Phi_2)$.³²

29. Les notations vectorielle ou tensorielle ne sont pas utilisées par Liénard, qui écrit — sauf exception — les trois équations en coordonnées cartésiennes.

30. Notons que l'utilisation du potentiel scalaire pour le magnétisme était largement répandue à l'époque. Elle se retrouve par exemple dans les *Leçons* de Joubert et Mascart 1882, vol. 1, p 345. De nos jours le potentiel scalaire n'est plus très utilisé dans l'enseignement pour la magnétostatique, mais le potentiel vecteur reste présent pour les phénomènes variables.

31. Par souci de cohérence les notations par rapport à l'article original sont inversées.

32. Dans la suite de l'étude nous montrerons le raisonnement de Liénard en utilisant la force, un raisonnement similaire est fait pour le couple subi.

Mais le point que soulève Liénard dans cet article est le suivant : quelle est l'expression de l'énergie potentielle pour un corps placé dans son propre potentiel ? Il pointe l'hypothèse de Maxwell selon laquelle l'expression 12.2 serait toujours valable.³³ Liénard raisonne ici par l'absurde, en supposant que l'expression reste effectivement correcte : le corps doit alors être en équilibre sous l'effet des forces intérieures. Or il montre que la résultante de ces forces intérieures est égale à :

$$-\frac{1}{2} \iint_S (\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{n}) \mathbf{M}_1 dS$$

quantité qui est en général non nulle, ce qui infirme l'hypothèse de Maxwell.

Dans la suite de l'article, Liénard cherche donc à déterminer l'expression exacte de la force subie par un aimant soumis à son propre potentiel. Il commence par rappeler les expressions de la force magnétique $\mathbf{H} = -\nabla\Phi$ et de l'induction magnétique $\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \mathbf{H} + \mathbf{M}$. De ces définitions, et en utilisant l'équation de Poisson, il tire :

$$\begin{cases} \nabla \wedge \mathbf{H} = 0 \\ \nabla \cdot \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \nabla \cdot \mathbf{H} + \nabla \cdot \mathbf{M} = 0 \end{cases} \quad (12.3)$$

Liénard suppose un ensemble de corps polarisés (aimants ou diélectriques), qui créent un potentiel total Φ . Il isole par la pensée un des corps polarisés, et note Φ_1 le potentiel créé par ce corps. Le reste du système crée un potentiel Φ_2 , tel que $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$. Les forces que le corps C_1 exerce sur lui-même étant nulles, il subit uniquement les forces dues au reste du système. Comme ces forces sont dues au potentiel extérieur, elles peuvent s'exprimer selon la formule de Maxwell, qui reste valable :

$$\mathbf{F} = - \iiint_{C_1} (\mathbf{M}_1 \cdot \nabla) (\nabla \Phi_2) dV = - \left(\iiint_{C_1} (\mathbf{M}_1 \cdot \nabla) (\nabla \Phi) dV - \iiint_{C_1} (\mathbf{M}_1 \cdot \nabla) (\nabla \Phi_1) dV \right)$$

Dans l'expression ci-dessus, nous utilisons simplement la linéarité pour faire apparaître un terme dépendant du potentiel total, et un autre qui ne dépend que du potentiel Φ_1 du corps. Or ce dernier terme peut être réécrit sous la forme démontrée plus haut, ce qui amène à la force :

$$\mathbf{F} = - \iiint_{C_1} (\mathbf{M}_1 \cdot \nabla) (\nabla \Phi) dV - \frac{1}{2} \iint_S (\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{n}) \mathbf{M}_1 dS$$

33. Voir Maxwell 1885, vol. II, p. 310.

À l'intérieur du corps C_1 , l'aimantation s'exprime par $\mathbf{M}_1 = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{H}$. En remplaçant $-\nabla\Phi$ par \mathbf{B} on obtient :³⁴

$$\mathbf{F} = \iiint_{C_1} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{H} dV - \iiint_{C_1} \nabla \left(\mu_0 \frac{\mathbf{H}^2}{2} \right) dV - \frac{1}{2} \iint_S (\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{n}) \mathbf{M}_1 dS \quad (12.4)$$

Dans l'expression de cette résultante, nous reconnaissons les deux premiers termes qui sont les forces prédites dans la théorie de Maxwell (voir 2.3 p. 63). Quelques précisions sont nécessaires : par rapport aux résultats de celui-ci, les termes dans l'expression de la force $(\nabla \cdot \mathbf{B}) \mathbf{H}$ (force sur une « masse magnétique ») et $(\nabla \wedge \mathbf{H}) \wedge \mathbf{B}$ (force de Laplace) sont ici nuls. Dans les équations que nous avons établies pour la théorie de Maxwell, il n'y avait que le terme de force dépendant de $(\mathbf{H} \cdot \nabla) \mathbf{H}$ car le milieu était non magnétique, mais Liénard considère une force qui dépend de $(\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H}$, ce qui donne deux termes distincts. La prise en compte du potentiel créé par le corps amène un terme supplémentaire. Une reformulation en terme d'intégrales de surface donne :

$$\mathbf{F} = \iint_{S_1} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{H} dS - \frac{1}{2} \iint_{S_1} \mu_0 \mathbf{H}^2 \mathbf{n} dS - \frac{1}{2} \iint_S (\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{n})^2 \mathbf{n} dS$$

Liénard écrit ensuite l'équilibre statique, en supposant d'éventuelles forces extérieures, intervenant par leur densité volumique \mathbf{f}_{ext} :

$$\mathbf{F} + \iiint_{C_1} \rho \mathbf{f}_{ext} dV + \iint_{S_1} \underline{\underline{P}} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

La pression à laquelle est soumise le corps C_1 , et qui vient équilibrer les forces magnétiques et extérieures, peut donc s'écrire comme la somme de quatre termes. Selon les notations de Liénard on a :

- Une pression P_1 qui équilibre les forces extérieures autres que le magnétisme.
- Une pression P_2 dont le tenseur a des termes non-diagonaux non nuls : $P_{2ij} = -H_i B_j$
- Une pression isotrope $P_{3ij} = \frac{1}{2} \mathbf{H}^2 \delta_{ij}$.
- Une pression P_4 qui est due au potentiel créé par le corps C_1 , pression isotrope qui vaut $(\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{n}) M_i \delta_{ij}$.

34. Nous prenons la force exercée sur le moment magnétique égale à $(\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B}$ et non $(\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H}$ comme le fait Liénard. \mathbf{M} étant constant, cela n'a que pour effet de conserver les unités avec le facteur μ_0 .

Liénard insiste longuement sur la nature et le rôle de ce dernier terme. Pour lui :³⁵

La manière dont la pression P_4 , varie en grandeur et en direction suivant l'orientation de la surface sur laquelle elle s'applique est absolument unique dans l'étude de la physique, et seuls les aimants et les diélectriques en montrent un exemple.

S'appuyant sur les différents termes de pression, Liénard émet plusieurs critiques sur le raisonnement de Maxwell. La première porte sur le fait que Maxwell n'a pas considéré la pression P_1 . Liénard montre que, même dans le cas de forces extérieures nulles, la pression P_1 peut être non nulle.³⁶ Surtout, la pression P_1 ne doit pas être valable que pour un raisonnement statique :³⁷

La valeur de la pression P_1 n'est pas arbitraire. Il faut la choisir parmi les solutions des équations [qui écrivent la pression totale comme la somme des quatre termes cités plus haut], de manière que pour une déformation virtuelle quelconque le travail des pressions soit égal et de signe contraire à la somme des travaux des forces extérieures, des forces magnétiques et des forces intérieures.

C'est ici la deuxième critique qu'il adresse au raisonnement de Maxwell, mettant en avant le fait que cette égalité des travaux n'a pas lieu si on considère les pressions P_2 , P_3 , « et même en rétablissant le terme P_1 l'égalité n'a pas lieu ». ³⁸ Liénard argue également du fait que la pression P_1 ne dépend pas que de l'état magnétique du milieu, mais de toutes les variables mécaniques, et donc de la difficulté de déterminer cette pression pour un matériau donné.

Enfin, la dernière critique qu'il dresse à l'encontre de Maxwell est l'impossibilité de déterminer un système de pression adéquat à partir des lois de l'élasticité. Liénard montre que le terme de pression supplémentaire P_4 , lorsqu'il agit sur un élément du 3^{ème} ordre (infinitement petit d'ordre 3) donne en général un terme du 2^{ème} ordre. Il conclut sur ce point :³⁹

35. Liénard 1894, p. 69.

36. Liénard donne les conditions suivantes : tenseur symétrique et qui vérifie $\nabla \cdot \underline{\underline{P}}_1 = \rho \mathbf{f}_{ext}$.

37. *Ibid.*

38. *Ibid.*

39. *Ibid.*, p. 9.

Ce résultat suffit à démontrer l'inanité de la théorie de Maxwell d'après laquelle les forces magnétiques pourraient être considérées comme résultant des déformations d'un milieu (éther) dans lequel tous les corps sont plongés. Les déformations d'un corps élastique primitivement isotrope ne sauraient engendrer des pressions telles qu'un élément de volume infiniment petit du troisième ordre soit soumis à des forces infiniment petites du deuxième.

Le résumé que fait Liénard de la théorie de Maxwell présente l'éther comme un corps élastique dont les déformations entraîneraient les forces magnétiques. Cette vision d'un éther élastique, bien qu'approximative, met en avant le rôle fondamental de ce milieu chez Maxwell.

Dans la dernière partie de son article, Liénard reprend des calculs de Duhem. Il reconnaît que Duhem, dans son étude du magnétisme,⁴⁰ a évité les deux dernières erreurs, mais que la première (l'omission de P_1) lui a échappé. Il reprend les calculs et montre que Duhem se trompe dans le calcul de la variation de la fonction d'énergie potentielle. Il termine en justifiant sa démarche :⁴¹

Nous aurions pu nous contenter de rectifier les formules de M. Duhem, car son mode de calcul permet de faire la détermination complète des pressions dans tous les cas, et est certainement le meilleur, mais nous avons cru préférable de ne pas nous borner là. D'abord, au point de vue historique, c'est par la suite de calculs que nous avons exposée que nous nous sommes aperçu de l'existence du terme correctif. De plus, en suivant pas à pas la méthode de Maxwell, on se rend même compte des points où les erreurs se sont glissées dans son raisonnement.

« *La théorie de Lorentz* » (*EE*, XIV, 1898, pp. 417-24 ; 456-61)

Cet article, publié en deux parties, est le premier des deux articles que Liénard écrit pour diffuser la théorie de Lorentz auprès d'un public plus large que les spécialistes du domaine. La publication de plusieurs articles sur la théorie de Lorentz en 1898 n'est pas due au hasard. C'est principalement suite aux travaux expérimentaux de Zeeman en 1896 et de J.J. Thomson en 1897 qu'elle gagne en popularité, avant que Lorentz ne détermine à son tour la valeur du quantum électrique (voir 4.2 p. 117).⁴²

40. Liénard donne pour référence pour Duhem les *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, vol. 2. voir p. 274.

41. *Ibid.*, p. 9.

42. Hormis l'article de Poincaré en 1895 intitulé « À propos de la théorie de M. Larmor » dans *L'Éclairage Électrique* (que nous avons déjà évoqué) et analyse peu celle de Lorentz, c'est en 1898 que la théorie de

Dans son introduction, Liénard motive cette volonté par le fait que « le mémoire de M. Lorentz contient une partie mathématique très développée qui en rend la lecture pénible pour tous ceux qui ne s'occupent pas spécialement de mathématiques », et il donne le principal intérêt de cette théorie, « à savoir la facilité avec laquelle elle explique l'entraînement partiel des ondes lumineuses ». ⁴³

Tout au long de son article, Liénard se base sur le mémoire de 1892 de Lorentz publié dans les *Archives néerlandaises*, ⁴⁴ et il garde une approche assez linéaire, en se référant régulièrement aux équations présentes dans ce travail. Il s'agit pour lui de faire avant tout une description détaillée des hypothèses et des résultats de Lorentz, description qu'il complète éventuellement par quelques analyses personnelles.

Dès le début Liénard présente la théorie de Lorentz comme une « superposition » de deux théories. La première contribution est le déplacement dans l'éther, qui possède les mêmes propriétés que le déplacement de Maxwell. Sur ce point, Liénard précise cependant que pour Lorentz l'éther est « entièrement immobile » et que le déplacement est « un simple vecteur représentant une perturbation électrique que cet éther est chargé de transmettre à distance », l'éther est donc le siège de l'énergie potentielle, l'énergie cinétique restant attachée à la matière. Liénard présente le second point de la théorie comme un autre déplacement, à l'intérieur du diélectrique, qui s'apparente à la polarisation de la théorie de Poisson, à la différence que chez Lorentz « l'électricité est invariablement liée à certaines particules mobiles ».

Dans le cas où seul le déplacement dans l'éther est considéré, Liénard donne les équations suivantes, selon la théorie de Maxwell :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E} = \rho \\ \nabla \cdot \mu_0 \mathbf{H} = 0 \\ \nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{j}_1 + \frac{\partial \epsilon_0 \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \wedge \mathbf{E} = -\frac{\partial \mu_0 \mathbf{H}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (12.5)$$

Quelques précisions sur les notations : Liénard définit la quantité ρ comme la « densité d'électricité vraie », ce qui reprend la définition mathématique de cette quantité par Hertz puis Lorentz. Nous verrons plus loin qu'elle correspond uniquement à la densité de charges libres. Le coefficient de perméabilité magnétique du vide μ_0 est égal à l'unité chez Lorentz,

Lorentz (datant de 1895) semble se diffuser le plus largement. À côté des articles de Liénard, on peut citer celui de Wien en 1898 devant les physiciens allemands (cité p. 117 en note).

43. Liénard 1898 (a), p. 417.

44. Voir : Lorentz 1892.

nous le garderons pour respecter le système d'unités SI. L'induction magnétique est alors $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$. Enfin, Liénard présente le courant \mathbf{j}_1 comme un « courant de conduction ». Ce courant est dû au mouvement des particules par rapport au milieu ; il correspond à la moyenne des déplacements de chaque particule $\mathbf{j}_1 = \langle \rho \mathbf{v}_1 \rangle$. Liénard différencie ce terme d'un courant que nous appellerons « courant de convection », dans le cas d'un mouvement d'ensemble du milieu par rapport à l'éther. Dans ce cas, il ajoute un terme supplémentaire $\rho \mathbf{v}_e$ au courant total.

La présentation que fait Liénard de la polarisation (notée \mathbf{P}) semble assez artificielle. Il l'introduit en faisant référence à la théorie de Poisson, dans laquelle la polarisation est équivalente à une distribution fictive d'électricité $\nabla \cdot \mathbf{P} = -\hat{\rho}$, où $\hat{\rho}$ est la densité volumique de charges liées.⁴⁵ Il ajoute que lors d'un mouvement, la variation de la polarisation entraîne l'apparition d'un courant. Liénard nomme ce nouveau terme « courant de déplacement ». Une précision sur le choix des termes : ce courant représente la variation totale de la polarisation dans un diélectrique en mouvement par rapport à l'éther fixe, il ne correspond pas au courant de déplacement selon Maxwell. Notons que Lorentz, dans son mémoire de 1892, conserve le terme de courant de déplacement pour désigner la variation du vecteur $\epsilon_0 \mathbf{E}$.⁴⁶

Il est difficile de dire si la dénomination est simplement maladroite, ou si Liénard met effectivement en relation les deux quantités. Quoiqu'il en soit ce choix de terme a probablement ajouté à la difficulté de compréhension par rapport à la notion de déplacement pour le lectorat. Nous garderons le terme « courant de déplacement » pour désigner la quantité $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$, et nous appellerons « courant de polarisation » la grandeur $\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}$. Dans un diélectrique en mouvement, il faut considérer la dérivée temporelle totale, Liénard donne pour ce courant de polarisation l'expression :⁴⁷

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + (\mathbf{v}_e \cdot \nabla) \mathbf{P}$$

La prise en compte de la polarisation l'amène donc à formuler les équations complètes dans le cas d'un diélectrique en mouvement :

45. Liénard note S la quantité $-\hat{\rho}$

46. Lorentz 1892, p. 455 : « Supposons que toutes les particules chargées se trouvent en repos et que dans l'éther il n'y ait aucun courant de déplacement ».

47. Dans la suite nous garderons la notation de Liénard : la dérivée $\frac{\partial}{\partial t}$ pour le déplacement dans le référentiel au repos (l'éther), et la notation $\frac{d}{dt}$ pour le déplacement dans le référentiel lié au corps en mouvement.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E} = \rho - \nabla \cdot \mathbf{P} \\ \nabla \cdot \mu_0 \mathbf{H} = 0 \\ \nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{j}_1 + \rho \mathbf{v} + \frac{\partial \epsilon_0 \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \nabla \wedge (\mathbf{P} \wedge \mathbf{v}_e) \\ \nabla \wedge \mathbf{E} = -\frac{\partial \mu_0 \mathbf{H}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (12.6)$$

Dans la première équation nous voyons apparaître le vecteur $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$, dont la divergence correspond à la quantité ρ , ce que nous avons défini comme la densité de charges libres (voir p. 383). Elle ne correspond pas à la densité microscopique totale de charge ρ_m qui devrait intervenir dans la relation $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_m / \epsilon_0$, que Liénard donne au début en l'absence de polarisation. C'est sa manière d'introduire la polarisation en remplaçant ρ par $\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}$ qui crée ce changement de signification.⁴⁸ Le courant total est la somme de quatre courants : conduction, qui correspond au mouvement des particules par rapport au conducteur ; convection, pour le mouvement d'ensemble du conducteur par rapport à l'éther ; le courant de « déplacement dans l'éther » du vecteur $\epsilon_0 \mathbf{E}$, et le courant de polarisation.

Liénard termine ce premier passage par une remarque assez surprenante. Il écrit que si ρ est considérée « comme une simple quantité définie mathématiquement », ⁴⁹ la description du système peut se faire en utilisant uniquement les vecteurs \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{P} , \mathbf{j}_1 , et ainsi « on peut présenter la théorie de M. Lorentz sous une forme analogue à celle employée par Hertz pour exposer la théorie de Maxwell », ⁵⁰ description basée sur les équations et les forces sans donner de réalité à la charge. Dans le cas de la théorie de Lorentz, qui attribue une place importante à la charge électrique et à la matière, une telle remarque est surprenante, car elle occulte la percée épistémologique d'une électricité liée à la matière, et de fait la disparition du rôle central de l'éther.

Dans la suite de son exposé, Liénard ne revient pas sur ce point. Pour étudier le cas des diélectriques en mouvement selon un axe il considère, comme Lorentz, « des diélectriques parfaits non électrisés de manière permanente », soit $\rho = 0$ et $\mathbf{j}_1 = \mathbf{0}$. Généralisons son raisonnement avec une vitesse quelconque \mathbf{v}_e : en combinant les deux dernières équations de 12.6, on obtient l'équation d'onde pour le vecteur déplacement \mathbf{D} :

48. L'approche moderne de cette équation consiste à écrire $\nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = \rho_{totale}$, où ρ_{totale} est la somme des charges libres et liées. On peut séparer en deux termes $\rho_{totale} = \rho_{libre} + \rho_{liée}$, puis relier la densité de charges liées à la polarisation : $\rho_{liée} = -\nabla \cdot \mathbf{P}$, ce qui amène à $\nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} + \nabla \cdot \mathbf{P} = \rho_{libre}$, où l'on peut faire apparaître le déplacement électrique.

49. Liénard pense ici à la définition que Hertz fait de la charge, comme le flux de la force électrique.

50. *Ibid.*, p. 420.

$$\square \mathbf{D} = \frac{1}{c^2} \left[\frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2} - (\mathbf{v}_e \cdot \nabla) \frac{d\mathbf{P}}{dt} + \frac{d\hat{\rho}}{dt} \mathbf{v}_e - (\mathbf{v}_e \cdot \nabla) \hat{\rho} \mathbf{v}_e \right] + \nabla \hat{\rho}$$

où \square représente l'opérateur $\Delta - \frac{1}{c^2} \left(\frac{d}{dt} - \mathbf{v}_e \cdot \nabla \right)^2$, $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ la vitesse de l'onde dans le vide et $\hat{\rho} = -\nabla \cdot \mathbf{P}$. De la même façon, on obtient pour la force magnétique \mathbf{H} , avec les mêmes notations :

$$\square \mathbf{H} = -(\nabla \hat{\rho}) \wedge \mathbf{v}_e - \frac{d}{dt} \nabla \wedge \mathbf{P}$$

Dans le cas où $v_e = 0$ on retrouve des équations de propagation de d'Alembert avec des termes sources. Pour simplifier ces termes sources qui dépendent de la polarisation, Liénard donne deux relations supplémentaires. Pour la première il suppose que \mathbf{P} est colinéaire à $\epsilon_0 \mathbf{E}$. Il se réfère bien sûr à l'hypothèse de Lorentz, et également à Poisson, qui montre que dans un diélectrique au repos la polarisation du diélectrique est proportionnelle à la force électrique \mathbf{E} . Il pose donc $\mathbf{P} = \chi_e \epsilon_0 \mathbf{E}$.⁵¹ La seconde hypothèse est l'expression de la force électrique dans un milieu en mouvement, pour laquelle l'expression $\mathbf{E} = \mathbf{D}/\epsilon_0$ n'est justement plus valable. Utilisant un chemin inverse de celui de Lorentz, Liénard démontre la nouvelle expression en partant de la loi d'induction. La force électrique qui doit être considérée est : $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}$.

À partir d'ici, Liénard met en place un raisonnement pour retrouver l'entraînement partiel des ondes lumineuses, en utilisant la polarisation. Décrivons cette démonstration, que nous comparerons ensuite à un autre raisonnement qu'il donne dans un article suivant. Il commence par s'intéresser au régime transitoire (le système n'est plus à l'équilibre). Dans ce cas particulier, la relation $\mathbf{P} = \chi_e \mathbf{D}$ n'est plus valable. En utilisant un raisonnement mécanique que nous détaillerons plus loin, il donne l'équation :

$$\chi_e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \wedge \mu_0 \mathbf{H}) = \mathbf{P} + \tau^2 \frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2} \quad (12.7)$$

Dans laquelle on pose $\tau^2 = \sqrt{m/e}$, paramètre sur lequel nous reviendrons plus loin. On peut en déduire une équation de propagation qui ne contient que la polarisation :

$$\frac{1}{\chi_e} \left(1 + \tau^2 \frac{d^2}{dt^2} \right) \square \mathbf{P} = \left(1 - \frac{v_e^2}{c^2} \right) \nabla \hat{\rho} + \frac{1}{c^2} \left[\frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2} + \frac{d\hat{\rho}}{dt} \mathbf{v}_e - \nabla \left(\mathbf{v}_e \cdot \frac{d\mathbf{P}}{dt} \right) \right] \quad (12.8)$$

51. Cette relation de proportionnalité correspond à un milieu linéaire, homogène et isotrope (MLHI). Dans son mémoire Lorentz ne se réfère pas à Poisson, il établit la proportionnalité par un raisonnement personnel sur la position moyenne du moment électrique \mathbf{p} pour une molécule. Voir Lorentz 1892, p. 470-1.

Pour une onde transverse dans la direction de mouvement du diélectrique, la relation de dispersion, donne :

$$\frac{1}{\chi_e} (1 - \tau^2 \omega^2) \left[k^2 - \frac{1}{c^2} (\omega + v_e k)^2 \right] = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (12.9)$$

Liénard définit la vitesse de déplacement de l'onde comme la quantité W telle que $\frac{d\mathbf{P}}{dx} = -\frac{1}{W} \frac{d\mathbf{P}}{dt}$, c'est-à-dire la vitesse de phase $W = \omega/k$. En injectant cette expression dans l'équation 12.9, et en arrangeant les termes on obtient :

$$\frac{c^2}{W^2} - 2\frac{2v_e}{W} - \frac{v_e^2}{W^2} = \frac{\chi_e}{1 - \tau^2 \omega^2} + 1$$

Le terme de droite correspond à l'indice optique, défini pour un milieu au repos. Pour une faible période, on retrouve la relation $n^2 = \chi_e + 1 = \epsilon_r$ prévue par Maxwell. En résolvant l'équation du second degré, on obtient pour W :

$$W = \pm W_0 - \frac{v_e}{n^2}$$

la vitesse de l'onde par rapport au milieu, soit une vitesse par rapport à l'éther de

$$W = \pm W_0 + v_e \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

Avant de poursuivre l'analyse de l'article, détaillons ici l'importance des deux hypothèses de Lorentz. La première porte sur l'expression de la force électrique à utiliser, $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}$. Liénard remarque que si l'on garde pour la force électrique le vecteur \mathbf{E} et non \mathbf{E}' , la vitesse des ondes obtenue est :

$$W = \pm W_0 + \frac{1}{2} v_e \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

et ne peut expliquer les phénomènes optiques (voir annexes), d'où la nécessité d'utiliser la force électrique de Lorentz.

La seconde hypothèse est celle permettant d'obtenir l'expression

$$\chi_e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \wedge \mu_0 \mathbf{H}) = \mathbf{P} + \tau^2 \frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2}$$

dans laquelle intervient notamment le paramètre $\tau = \sqrt{m/e}$. Pour obtenir cette expression, Liénard utilise un simple raisonnement mécanique pour un moment dipolaire :⁵² à

52. La polarisation correspond à la moyenne volumique des moments dipolaires, elle s'obtient simplement en intégrant.

l'équilibre, le moment \mathbf{p} est proportionnel à la force extérieure : $\mathbf{p} = \chi_e \mathbf{F}_{ext}$. Tant que le système n'est pas à l'équilibre, Liénard fait l'hypothèse la plus simple consistant à dire que la force qui agit sur le moment électrique est proportionnelle à $\chi_e \mathbf{F}_{ext} - \mathbf{p}$. En écrivant la seconde loi de Newton pour le moment électrique, le terme d'accélération est $m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{m}{e} \frac{d^2 (e \mathbf{r})}{dt^2}$, où $e \mathbf{r} = \mathbf{p}$. On retrouve donc l'équation liant polarisation et force extérieure, avec l'apparition du facteur m/e , que nous désignons par τ^2 . Le point important est bien sûr le choix de cette force extérieure, qui doit être prise égale à \mathbf{E}' et non \mathbf{E} . La différence est le terme $\mathbf{v}_e \wedge \mu_0 \mathbf{H}$, qui vient de la considération du champ apparent. Nous avons vu que ce terme avait une grande importance pour retrouver le coefficient d'entraînement partiel de Fresnel.

Cette équation est celle d'un oscillateur harmonique en régime forcé. Comme il s'agit d'un oscillateur purement harmonique (sans terme de frottements), il doit y avoir un phénomène de résonance. Il apparaît clairement lorsqu'on regarde la relation de dispersion sous la forme :

$$\frac{\omega^2}{k^2} = c^2 \frac{1 - (\tau\omega)^2}{\epsilon_r - (\tau\omega)^2}$$

qui donne une résonance pour une fréquence $\omega_r = \sqrt{\epsilon_r}/\tau$.

À aucun moment Liénard ne semble accorder de l'importance à cette singularité mathématique. Il évoque le terme dû aux frottements, mais dans le cadre de son article il préfère ne pas en ajouter, « pour faire coïncider nos formules avec celles de M. Lorentz ». ⁵³

Au niveau microscopique, cette résonance s'explique très simplement comme le comportement d'un oscillateur local soumis à une force élastique de raideur e (la charge). Lorsque la fréquence d'excitation ω est égale à la pulsation propre du système $\omega_0 = 1/\tau$, les moments dipolaires s'alignent en même temps sur l'excitation, sans avoir d'influence mutuelle, d'où une impossibilité pour la polarisation de se propager. Lorsque ω est égale à ω_r , le système entre en résonance, avec une divergence de la vitesse à l'infini. ⁵⁴ Notons que lorsque ω est compris entre 1 et $\sqrt{\epsilon_r}$, le rapport ω^2/k^2 est négatif, et la vitesse de phase W est un imaginaire pur. La conséquence est l'impossibilité pour une onde de se propager (« onde évanescente »), le milieu est opaque à cette plage de fréquence (point que Liénard ne discute pas).

53. L'introduction d'une force de frottements (qui ajoute un terme $+i\alpha\omega$ au dénominateur en formalisme complexe) est l'élément qui permet d'éviter une discontinuité de la susceptibilité électrique du matériau. La dispersion « anormale », nommée ainsi car ne suivant par la loi « normale » de Maxwell $n = \sqrt{\epsilon_r}$, est expliquée par Hemholtz puis par Lorentz dans un modèle atomiste dès 1878. Voir Darrigol 2000 (b), p. 325. Dans son mémoire, Lorentz n'évoque pas non plus le cas d'une singularité, il considère que le facteur $\tau\omega/\sqrt{\epsilon_r}$ peut être d'une valeur sensible « tout en restant inférieur à l'unité ». Voir également Lorentz 1892, p. 497.

54. Une analogie mécanique est ici difficile à établir, étant donné que la force excitatrice n'est pas indépendante de la polarisation.

Dans la dernière partie de son article, Liénard aborde les forces pondéromotrices sur un diélectrique, et la vérification des principes de la mécanique : principe de réaction et conservation de l'énergie. Nous ne développerons que le premier, et l'explication que tente Liénard, explication rejetée par Poincaré (voir 11.3, p. 362). Il montre que la force pondéromotrice par unité de volume peut se mettre sous la forme :

$$d\mathbf{f} = \nabla \left(\frac{\mu_0 \mathbf{H}^2}{2} \right) + \nabla \left(\frac{\epsilon_0 \mathbf{E}^2}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \mathbf{E} \wedge \mu_0 \mathbf{H}) \quad (12.10)$$

Les deux premiers termes, correspondant aux pressions électrique et magnétique prédites par Maxwell, vont s'annuler lorsque l'intégration est faite sur tout l'espace. Il n'en est pas de même du terme en $\partial(\mathbf{E} \wedge \mathbf{H})/\partial t$. Liénard nous dit :⁵⁵

Ce résultat n'a rien qui doive surprendre : du moment que l'on rejette la théorie des actions à distance, et que l'on admet au contraire que les forces mettent un certain temps à se propager à travers l'éther, il ne peut plus y avoir à chaque instant égalité entre l'action et la réaction, l'action et la réaction ne se produisant pas au même moment. Tout ce qu'on peut demander, c'est que la résultante de toutes les forces soit nulle en moyenne, et c'est bien ce qui a lieu pour la théorie de M. Lorentz [...]

Pour Liénard, la moyenne temporelle de la force totale (intégrée sur l'espace), moyenne prise sur une durée T , est :

$$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \mathbf{F} dt = -\frac{1}{Tc^2} \left[\int \mathbf{E} \wedge \mathbf{H} dV \right]_t^{t+T}$$

L'intégrale dans le crochet étant prise sur tout l'espace. L'explication de Liénard est la suivante : puisque les forces électriques et magnétiques restent finies, il en est de même pour l'intégrale dans le crochet. Lorsque T tend vers une valeur importante, le second terme de l'égalité tend vers 0, donc la valeur moyenne de \mathbf{F} tend vers 0. Comme nous l'avons vu, Poincaré corrige dans son cours de 1899 cette hypothèse en montrant qu'un corps émettant de l'énergie sous forme électromagnétique subirait un recul. En utilisant l'induction magnétique, cette impulsion correspond en fait à $\int \epsilon_0 \mathbf{E} \wedge \mathbf{B} dV$.

Terminons sur le principe de réaction, par la remarque que Liénard fait sur la théorie de Hertz. Il avance que :⁵⁶

55. *Ibid.*, p. 457.

56. *Ibid.*, p. 457.

Lorsque, dans la théorie de Hertz, on veut vérifier le principe de l'égalité de l'action et de la réaction, on est obligé d'effectuer des intégrations dans tout l'espace. Or dans l'éther les charges magnétiques et électriques sont bien nulles, ainsi que les courants de conduction et de convection, mais il n'en est pas de même du courant de déplacement. En effet, dans les théories de Hertz et de Maxwell, l'éther ne diffère des diélectriques pondérables que par la valeur particulière $\epsilon = \epsilon_0$ du pouvoir inducteur. Il y a donc un courant de déplacement de composantes $\epsilon_r \frac{d\epsilon_0 \mathbf{E}}{dt}$ qui subit, de la part du champ magnétique, une force différente de zéro. Le principe de l'égalité de l'action et de la réaction n'est donc vérifié qu'en tenant compte des forces exercées sur l'éther [...].

Cette analyse du principe de réaction chez Hertz est correcte au niveau formelle, mais elle omet un point que nous avons déjà signalé (voir 11.3 p. 363) : chez Hertz, la distinction entre éther et matière n'a pas de sens, puisque la matière ne fait que modifier localement les propriétés de l'éther. Les forces ne peuvent que s'exercer sur l'éther, en conséquence, le fait que le principe de réaction ne soit vérifié « qu'en tenant compte des forces exercées sur l'éther » est une tautologie.

Dans ce premier article sur la théorie de Lorentz, le résumé que fait Liénard est mitigé. Sa maîtrise mathématique lui permet d'exposer pas à pas le raisonnement et de comparer les équations à celles du scientifique néerlandais. Il met en avant les grandes hypothèses de la théorie, ainsi que les résultats — en particulier l'explication des phénomènes optiques. Néanmoins, l'analyse qu'il livre sur le rôle de l'éther semble incorrecte. Plus précisément, c'est dans la comparaison entre la théorie de Lorentz et celle de Hertz qu'il s'égare, à deux reprises. Lorsqu'il signale que la théorie de Lorentz peut être traitée de façon purement formelle sans attribuer de réalité à la charge, il omet un point essentiel de la théorie de Lorentz. De même, en opposant chez Hertz matière et éther dans le principe de réaction, il introduit une distinction qui n'existe que chez Lorentz. Sa justification du principe de réaction chez Lorentz en arguant de la nullité de la force en moyenne est également incorrecte, comme le montre Poincaré.

« *La théorie de Lorentz et celle de Larmor* » (*EE, XVI, 1898, pp. 320-34 ; 360-5*)

Dans cet article paru en août 1898, Liénard revient sur la théorie de Lorentz pour discuter de nouveaux travaux. Dans son introduction, il justifie sa démarche en disant qu'il a déjà étudié le mémoire de 1892 dans un article précédent (celui de mars 1898), mais que « depuis

cette époque, M. Lorentz est revenu sur sa théorie pour la simplifier et en approfondir les conséquences ». ⁵⁷ Il mentionne notamment deux travaux de Lorentz : si le mémoire de 1895 « Sur une théorie des phénomènes électriques et optiques dans les corps en mouvement » ne peut alors pas être qualifié de très récent, ⁵⁸ Liénard se réfère également à un second mémoire, publié en 1897 dans la revue de l'Académie des sciences néerlandaise (ce second mémoire fait référence au premier mémoire de 1895). ⁵⁹ Il paraît difficile que Liénard n'ait pris connaissance du mémoire de 1895 qu'après avoir publié son premier article début 1898, mais c'est probablement le cas pour le mémoire de 1897.

Dans ce nouvel article, Liénard suit toujours la démarche de Lorentz. Il rappelle les équations pour un corps au repos, avant de donner l'expression des grandeurs pour un corps en mouvement. Comme Liénard le dit au début de son article, le but est « d'examiner surtout l'influence du mouvement de la terre sur les observations faites à sa surface, tant pour les phénomènes électriques que pour les expériences d'optique ». Toutes les quantités sans accentuation sont écrites dans le référentiel de l'éther, qui est le référentiel d'écriture des équations de Maxwell. ⁶⁰

Comme dans le premier article, on retrouve l'expression de la force électrique apparente dans un corps en mouvement, mais ce changement de variables est cette fois appliqué à toutes les grandeurs. Il s'inscrit dans le raisonnement de Lorentz articulé autour du principe des états correspondants (Liénard ne l'aborde que plus tard dans son article, pour des raisons de commodité nous l'évoquons dès maintenant). Ce raisonnement consiste à écrire les équations du champ pour un système de charges au repos, puis de considérer le *même système* tout entier mis en mouvement à vitesse constante \mathbf{v}_e , en réécrivant les équations avec de nouvelles variables *pour retomber sur les équations du système au repos*. Le raisonnement est fait avec une approximation au premier ordre en v_e/c .

Ce changement de variables concerne les coordonnées d'espace x', y', z' mais également le temps, une « variable fictive » t' , que Lorentz nomme le « temps local ». Ainsi, Liénard donne le changement de variable :

$$t' = t - \frac{v_e x}{c^2}$$

On retrouve également la force électrique apparente, présente dans le premier article,

57. Liénard 1898 (c), p. 320.

58. « *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Ersclzeinungen in bewegten Körpern* ». Voir Lorentz 1895, également dans Lorentz 1937.

59. Lorentz 1897

60. *Ibid.*

mais également l'expression pour l'induction magnétique $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$. En notant \mathbf{v}_e la vitesse d'entraînement du corps en mouvement, les forces pour un système en mouvement seront :

$$\begin{cases} \mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B} \\ \mathbf{B}' = \mathbf{B} + \frac{\mathbf{E} \wedge \mathbf{v}_e}{c^2} \end{cases}$$

Tout au long de l'article, Liénard utilise l'expression de ces deux vecteurs, ainsi que l'expression des équations du champ du système en mouvement, pour traiter les applications aux phénomènes électriques (électrostatique, électrodynamique, induction) et optiques (entraînement des ondes, expérience de Michelson). Nous développerons particulièrement deux points présents dans cet article : le premier est l'introduction de ce que Poincaré désignera comme la force de Liénard, le second est l'utilisation du théorème des états correspondants.

Dans une première partie, Liénard s'intéresse à la force subie par le corps en mouvement. Dans le cas d'un corps immobile par rapport à l'éther, avec une densité de charge ρ et parcouru par un courant \mathbf{j} , deux forces s'exercent : la force électrostatique, égale à $\rho \mathbf{E}$, et la force électromagnétique égale à $\mathbf{j} \wedge \mathbf{B}$. La force totale est la somme de ces deux termes : $\mathbf{f} = \rho \mathbf{E} + \mathbf{j} \wedge \mathbf{B}$.

Liénard souhaite exprimer cette force dans le cas d'un système en mouvement. Il commence par donner la loi de transformation pour une densité volumique de charge ρ . Il l'obtient en réécrivant l'équation $\nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E} = \rho$ avec les nouvelles coordonnées d'espace et l'expression de \mathbf{E}' , ce qui donne (voir Annexe n° 14 pour les démonstrations) :

$$\rho' = \rho - \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{v}_e}{c^2}$$

Le terme en $-\frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{v}_e}{c^2}$ est la « charge de compensation », terme que Liénard reprend de Lorentz.

Le raisonnement que fait Liénard pour illustrer l'existence de la force complémentaire n'est pas particulièrement pédagogique. Il se place dans le cas particulier d'un conducteur parcouru par un courant. Il reprend sa transformation de la charge pour poser qu'« à l'état permanent le conducteur aura en plus de la charge qu'il aurait au repos, une charge supplémentaire ; appelée charge de compensation par M. Lorentz, de densité $\frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{v}_e}{c^2}$ en chaque point » (Liénard ne met pas le signe ' - ' devant la charge de compensation, peut-être par oubli).⁶¹ Concernant cette « charge au repos », et même si Liénard ne le dit pas explicitement, il considère que le conducteur au repos est non chargé ($\rho = 0$). Cette charge de compensation qui apparaît dans le cas d'un système mis en mouvement enfrait-elle la conservation de la charge ? Liénard

61. *Ibid.*, p. 322.

montre qu'en intégrant sa valeur sur l'ensemble du volume du conducteur la charge totale de compensation est bien nulle en régime permanent.

Pour trouver le terme complémentaire dans la force, Liénard considère d'une part les actions électrostatiques, et d'autres part les actions électromagnétiques, et regarde pour chacun de ces deux termes la différence entre le cas du système au repos et celui du système en mouvement. Pour les actions électrostatiques, il considère que « la force électrique en chaque point a la même valeur que pour le même système au repos, mais il y a en plus la charge de compensation ; de sorte que chaque élément du conducteur reçoit un surcroît d'effort dont les composantes sont » :⁶²

$$-\frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{v}_e}{c^2} \mathbf{E}$$

Cette justification de Liénard n'est pas très explicite. En effet, la force électrique \mathbf{E}' pour le système en mouvement est différente de la force \mathbf{E} pour le système au repos ($\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}$), mais le terme supplémentaire est négligé lors du calcul. En prenant $\rho = 0$, on a au premier ordre :

$$\rho' \mathbf{E}' = -\frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{v}_e}{c^2} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}) \approx -\frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{v}_e}{c^2} \mathbf{E}$$

Dans le cas des actions électromagnétiques, Liénard considère que la différence de force entre les deux systèmes est $\mathbf{j} \wedge (\mathbf{B}' - \mathbf{B})$ (il n'introduit pas de « courant apparent » \mathbf{j}' , nous y reviendrons plus loin). Cette différence donne :⁶³

$$\mathbf{j} \wedge \left(\frac{\mathbf{E} \wedge \mathbf{v}_e}{c^2} \right) = \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{v}_e}{c^2} \mathbf{E} - \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}}{c^2} \mathbf{v}_e$$

Le premier terme se simplifie avec les actions électrostatiques, et on trouve un terme de force supplémentaire dans le cas du système en mouvement

$$-\frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}}{c^2} \mathbf{v}_e$$

Pour résumer : Liénard écrit la force subie par un conducteur lorsque celui-ci est en mouvement, qu'il compare à celle que subirait un corps au repos par rapport à l'éther. La force subie par le système lorsqu'il est en mouvement est la même que celle qu'il subirait en étant au repos, à l'exception d'un terme complémentaire :

62. *Ibid.*, p. 322. Ce que Liénard désigne par « force électrique » est la quantité \mathbf{E} . La force (mécanique) est nommée « force pondéromotrice ».

63. La formule utilisée est l'identité du double produit vectoriel. Dans son raisonnement Liénard prend les différences dans l'autre sens, ce qui ne change rien.

$$\mathbf{f}' = \mathbf{f} - \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}}{c^2} \mathbf{v}_e \quad (12.11)$$

Ce terme complémentaire est la force de Liénard. Au premier ordre, on peut également prendre l'expression $-\frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}'}{c^2} \mathbf{v}_e$

Liénard fait deux remarques sur l'expression de cette force. Dans un premier temps, il montre, comme il l'avait fait pour la charge de compensation, que la résultante de cette force sur l'ensemble du conducteur est nul. Il considère pour cela un conducteur soumis à une force électromotrice d'un générateur (comme une pile) \mathbf{E}_g , et de résistance R . La loi de Ohm s'écrit :⁶⁴

$$\frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}'}{c^2} \mathbf{v}_e = \frac{v_e}{c^2} [R\mathbf{j}^2 - \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}_g]$$

Or Liénard fait remarquer que pour un conducteur à l'état permanent, il y a égalité entre les deux termes du membre de droite : la chaleur perdue par effet Joule est égale à celle fournie par le générateur. Cette égalité reste valable dans le cas d'un système en mouvement (Liénard ne le précise pas, c'est une remarque que Poincaré fait dans son mémoire de 1900, voir p. 365). L'intégrale de cette force complémentaire prise sur l'ensemble du conducteur (donc sur tout l'espace, puisque $\mathbf{j} = \mathbf{0}$ ailleurs) est identiquement nulle. Liénard précise que cette force se résume à un couple selon l'axe de déplacement du système.

Liénard fait une seconde remarque sur cette force : Lorentz, dans son mémoire de 1895, trouve au contraire que la force complémentaire n'existe pas au premier ordre. Liénard cherche donc à mettre en évidence l'existence de cette force par une autre méthode plus générale. Il reprend la résultante des forces du champ électromagnétique (équation 12.10) :

$$d\mathbf{f} = \nabla \left(\frac{\mathbf{B}^2}{2\mu_0} \right) + \nabla \left(\frac{\epsilon_0 \mathbf{E}^2}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \mathbf{E} \wedge \mathbf{B})$$

Dans cette expression, Liénard utilise les changements de coordonnées et de forces (\mathbf{E}' et \mathbf{B}') pour écrire la résultante dans le cas d'un système en mouvement. De cette façon, il fait apparaître dans le cas d'un régime permanent une force complémentaire :

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} \wedge \mathbf{B}) = [\mathbf{B} \cdot (\nabla \wedge \epsilon_0 \mathbf{E}) - \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot (\nabla \wedge \mathbf{B})] \mathbf{v}_e$$

Dans le cas d'un régime permanent, le premier terme est nul et $\nabla \wedge \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$, on retrouve donc la force de Liénard.

64. De nos jours, cette loi est présentée comme la « loi d'Ohm intégrale », et c'est plutôt la variante électrocinétique qui est enseignée : $U + U_g = Ri$, où U est la force électromotrice d'induction, U_g la tension du générateur et i l'intensité.

Notons que Liénard, qui considère un conducteur en régime permanent, ne peut probablement pas faire un raisonnement plus général en trouvant le même résultat. Dans son raisonnement sur les actions électrostatiques, il prend uniquement en compte l'action du champ électrique sur la charge de compensation en considérant que ρ est nulle. S'il prend la charge totale pour un système en mouvement (donc qui subit le champ électrique *apparent* $\mathbf{E} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$), il obtient une différence (au premier ordre en v_e/c) :

$$\rho' \mathbf{E}' = \rho \mathbf{E} - \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{v}_e}{c^2} \mathbf{E} + \rho \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}$$

avec un terme supplémentaire qui doit intervenir dans l'expression finale de la force.

Pour compenser ce terme, il faut considérer un deuxième élément (que Liénard n'a pas) : la variation du courant de conduction. En effet, si l'on considère que la charge volumique se transforme, le courant de conduction doit le faire aussi, au premier ordre :⁶⁵

$$\mathbf{j}' = \mathbf{j} - \rho \mathbf{v}_e$$

La différence des actions électromagnétiques doit donc être $\mathbf{j}' \wedge \mathbf{B}' - \mathbf{j} \wedge \mathbf{B}$, ce qui donne (toujours au premier ordre) :

$$\mathbf{j} \wedge \left(\frac{\mathbf{E} \wedge \mathbf{v}_e}{c^2} \right) - \rho \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}$$

Le premier terme, présent dans le raisonnement initial, amène bien à la force de Liénard. Le second terme se simplifie avec celui qu'on obtient par le raisonnement « complet » sur les actions électrostatiques.⁶⁶

65. La charge volumique (ou densité volumique de charge) se transforme à cause de la transformation des coordonnées d'espace. Si la charge électrique totale Q est conservée, la densité Q/V , où V est le volume, doit varier. Dans le formalisme de la relativité la quantité $(\rho c, \mathbf{j})$ se transforme comme un quadri-vecteur.

66. Un autre raisonnement tiré de Darrigol 2000 (a) consiste à considérer deux référentiels différents et à mettre le courant de conduction sous la forme d'un déplacement de charge à la vitesse \mathbf{v} par rapport au corps en mouvement. La transformation de la charge s'écrit alors

$$\rho' = \rho \left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}_e}{c^2} \right)$$

Dans le nouveau référentiel, la force subie par l'ensemble des particules est (par unité de volume) :

$$\mathbf{f}' = \rho' [\mathbf{E}' + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}']$$

c'est-à-dire la force de Lorentz écrite dans le référentiel attaché au mouvement. En remplaçant ρ' , \mathbf{E}' et \mathbf{B}' par leur expression on obtient (toujours au premier ordre) :

$$\mathbf{f}' = \rho [\mathbf{E} + (\mathbf{v} + \mathbf{v}_e) \wedge \mathbf{B}] - \rho \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}}{c^2} \mathbf{v}_e = \mathbf{f} - \rho \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}}{c^2} \mathbf{v}_e$$

Concernant la variation du courant de conduction, il semble qu'il ne l'ait même jamais envisagée. Cette correction est apportée par Poincaré dans son cours *Électricité et Optique* de 1901, où il considère que le courant de conduction dans le mouvement est $\mathbf{j}' = \mathbf{j} - \rho \mathbf{v}_e$.⁶⁷

Reprenons l'expression de la force totale (force de Lorentz) par unité de volume $\mathbf{f}' = \mathbf{f} - \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}}{c^2} \mathbf{v}_e$. On constate que pour un corps en mouvement il est nécessaire de corriger l'expression en ajoutant un terme $-\frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}}{c^2} \mathbf{v}_e$. C'est de cette force complémentaire qu'argue Poincaré lorsqu'il montre que le principe de réaction nécessite un terme de correction pour être vérifié. Dans son mémoire de 1895, Lorentz ne donne pas ce terme. Liénard propose une application numérique pour évaluer si le terme en question peut avoir une influence sur les phénomènes observés : si la puissance dissipée par le circuit est de 100 kW (puissance développée par un moteur de petite voiture), la force complémentaire qui agit sur lui vaut $3,3 \cdot 10^{-8}$ N (poids d'un grain de sable), ce qui en fait une force indétectable.

Le second point dans cet article que nous développerons (en lien avec Lorentz) est la démonstration de l'entraînement partiel des ondes. Dans son premier article, la preuve, assez laborieuse, nécessitait d'établir l'équation de propagation pour la polarisation et de déterminer l'équation de dispersion pour une onde. Dans cette nouvelle approche, Liénard reprend un élément important du mémoire de 1895 de Lorentz : le théorème des états correspondants. Il le présente ainsi :⁶⁸

Étant donné pour un système de corps en repos un état vibratoire, dans lequel

$$\mathbf{E}, \mathbf{P}, \mathbf{B}$$

sont des fonctions de x, y, z, t ; si le système vient à être déplacé avec une vitesse v_e , il pourra y exister un état vibratoire, tel que :

$$\mathbf{E}', \mathbf{P}, \mathbf{B}'$$

soient les mêmes fonctions de x, y, z, t' (c'est-à-dire $t - \frac{xv_e}{c^2}$)

Le premier terme représente la force de Lorentz écrite dans le référentiel fixe. Notons que si l'on souhaite rapprocher ce raisonnement de celui de Liénard, cela revient à prendre pour le courant de conduction (qui intervient dans le second terme de la force de Lorentz, ce que Liénard appelle actions électromagnétiques) $\mathbf{j}' = \rho' \mathbf{v} \approx \rho \mathbf{v}$ (au premier ordre) et $\mathbf{j} = \rho (\mathbf{v} + \mathbf{v}_e) = \mathbf{j}' + \rho \mathbf{v}_e$, c'est-à-dire admettre implicitement la loi de transformation des courants, loi que Liénard n'a pas.

67. Poincaré 1901, p. 537-8. La formulation de Poincaré n'est pas aussi explicite sur la transformation de courant que sur la transformation de la charge. En réalité il écrit dans le référentiel de l'éther que le courant de conduction est $\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}_e + \mathbf{E}'/\lambda$, où λ est la résistivité spécifique du circuit. Le terme en \mathbf{E}' représente le courant de conduction \mathbf{j}' du circuit en mouvement.

68. Liénard 1898 (c), p. 326. Liénard considère un mouvement relatif selon l'axe x uniquement.

Liénard mentionne la polarisation \mathbf{P} , qui reste attachée au corps, et qui ne change donc pas si ce corps est mis en mouvement. Sur ce point, soulignons que Lorentz ne fait pas un changement de référentiel (auquel cas on devrait exprimer la polarisation dans le référentiel fixe) : il regarde la différence entre un corps au repos et un corps en mouvement. C'est le principe d'une transformation active.⁶⁹ La polarisation ne joue d'ailleurs aucun rôle dans la détermination de la vitesse d'entraînement des ondes. Le raisonnement est le suivant : pour une onde plane dans le « premier état » (d'après les termes de Liénard), \mathbf{E} et \mathbf{B} dépendent de la variable $t - \mathbf{u} \cdot \mathbf{r}/W$, où W est la vitesse de l'onde et \mathbf{u} le vecteur directeur unitaire. Dans le deuxième état, pour le cas général d'une vitesse relative \mathbf{v}_e , les grandeurs \mathbf{E}' et \mathbf{B}' dépendent de la quantité

$$t' - \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{r}}{W} = t - \left(\frac{\mathbf{v}_e}{c^2} - \frac{\mathbf{u}}{W} \right) \cdot \mathbf{r}$$

qui est la phase (totale) de l'onde. Posons $\frac{\mathbf{u}'}{W'} = \frac{\mathbf{v}_e}{c^2} - \frac{\mathbf{u}}{W}$, avec \mathbf{u}' le vecteur directeur apparent de l'onde ($\|\mathbf{u}'\| = 1$). Alors au premier ordre on trouve

$$W' = W \left(1 - \frac{\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{u}}{c^2} \right)$$

qui correspond à la formule d'entraînement partiel des ondes (et d'entraînement de l'éther chez Fresnel). Liénard mentionne que ce raisonnement sur l'invariance de la phase permet aussi de retrouver l'effet Doppler et l'explication des aberrations.⁷⁰ L'écriture des vecteurs \mathbf{E}' et \mathbf{B}' pour le référentiel en mouvement apparaît dans la suite logique du premier article, dans lequel Liénard exprime déjà \mathbf{E}' . Le temps local est introduit, ce qui modifie la dépendance des grandeurs par rapport aux variables. Par rapport à la première démonstration impliquant la propagation de la polarisation, celle-ci, plus rapide, est largement différente. Mais Liénard aborde un peu plus loin le cas des diélectriques polarisés, et retrouve des équations de propagations semblables à celles obtenues dans son premier article.

Liénard discute le rôle de la variable t' lorsqu'il traite des expériences de Michelson (il ne mentionne pas Morley). Ces expériences, d'après Liénard, montre que le mouvement de la Terre n'a pas d'influence sur les phénomènes optiques observés même au deuxième ordre

69. Sur ce point voir Bracco et Provost 2006.

70. L'effet Doppler est la transformation de la période d'une onde lors d'un changement de référentiel. Si la période dans le référentiel attaché à l'émetteur est T_0 , la période dans le référentiel fixe est $T = T_0 \left(1 + \frac{v_e}{c} \right)$, c étant la vitesse de la perturbation et v_e la vitesse algébrique de déplacement. Cet effet est particulièrement bien connu dans le domaine sonore, par exemple avec le son produit par les ambulances se rapprochant (le son perçu est plus aigu) ou s'éloignant (le son perçu est plus grave).

(c'est-à-dire en tenant compte des termes en v_e^2/c^2). Il propose donc de reprendre les équations en conservant ces termes. Il montre que les nouvelles équations sont semblables à celles décrivant le phénomène de biréfringence dans les milieux anisotropes, l'axe optique étant ici l'axe du mouvement. L'introduction de la variable t' modifie la relation de dispersion, et introduit une sorte de biréfringence du milieu avec deux surfaces d'ondes distinctes. Concernant ces ondes, Liénard renvoie au caractère fictif de t' et écrit :⁷¹

Il ne s'agit d'ailleurs ici que d'ondes fictives puisque c'est le temps local t' , et non t qui figure dans les équations.

Ce passage souligne la limite à laquelle se trouve les travaux de Lorentz : l'éther en tant que milieu a totalement disparu, et pour subsister en tant que référentiel privilégié il se maintient uniquement par la différenciation faite entre le temps « vrai » et le temps « local ».

Dans la seconde partie de son article, Liénard développe rapidement la théorie de Larmor. Il se base notamment sur les deux premières parties du mémoire du physicien irlandais.⁷² Il mentionne en particulier les travaux du physicien MacCullagh, qui sont à l'origine de la théorie de Larmor. L'éther rotationnel de ce dernier admet pour équations de base

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{H} = \frac{d\boldsymbol{\delta}}{dt} \\ \mathbf{E} = \nabla \wedge \boldsymbol{\delta} \end{array} \right. \quad (12.12)$$

où $\boldsymbol{\delta}$ représente le déplacement d'un point de l'éther. La vitesse de l'éther correspond donc à la force magnétique, et sa vorticité à la force électrique.

Après avoir évoqué cette vision d'un éther rotationnel, Liénard développe surtout la seconde hypothèse de Larmor :⁷³

M. Larmor introduit l'hypothèse que les molécules matérielles contiennent des particules électrisées [...]. Les développements de cette nouvelle hypothèse sont en grande partie indépendants de l'hypothèse fondamentale sur les propriétés de l'éther et reposent seulement sur les lois expérimentales généralement admises.

Le premier point qu'il développe largement est une contradiction que la théorie de Larmor a avec l'expérience sur les aimants permanents. La théorie prévoit en effet que les forces

71. *Ibid.*, p 331. Dans son raisonnement Liénard conserve les termes en v_e^2/c^2 dans les équations de Maxwell mais il utilise la même définition des variables x' et t' faite au premier ordre.

72. Voir Larmor 1893 et 1895. Liénard souligne que lors de la rédaction de son article il n'a pas encore étudié la dernière partie du mémoire, publiée en 1897, qui aborde les liens entre éther et matière pondérable.

73. *Ibid.*, p. 331.

entre aimants soient de signe contraire à l'expérience. Larmor fait l'hypothèse des courants particuliers d'Ampère. D'autre part, il suppose qu'il ne peut y avoir de courants créés par induction dans un conducteur parfait. Considérons un aimant permanent : comme il n'y a pas de magnétisme, ce sont des courants qui sont à l'origine des propriétés de l'aimant ; cet aimant étant permanent, les courants ne s'affaiblissent pas, donc le conducteur est parfait ; et comme il ne peut y avoir de courants induits, ce sont des courants permanents. Donc l'énergie d'un aimant est égale à celle d'un système de courants équivalents. Or d'après l'expérience, les énergies d'un aimant et d'un système de courants équivalents sont de signe opposé. Liénard en déduit une erreur de signe sur les forces qui s'exercent entre aimants dans la théorie de Larmor.

Cette contradiction a mené Larmor à remplacer ses courants de conduction par des courants dus aux mouvements des particules chargées (que Larmor nomme « électrons », Liénard gardant l'appellation « ions ») à l'intérieur des molécules. Ces ions décrivent des orbites, et produisent de fait des courants de conduction. Liénard remarque que cette hypothèse de Larmor permet de rendre compte du phénomène d'hystérésis,⁷⁴ dû à la perte d'énergie par radiation d'un ion.

Une autre difficulté de la théorie de Larmor mise en avant par Liénard est la production du champ magnétique par un ion en mouvement. Larmor prévoit en effet qu'un corps chargé en mouvement de rotation autour d'un axe, et symétrique autour de cet axe, ne produise pas de force magnétique, ce qui est contraire à l'expérience. Larmor résout ce problème en supposant que la charge est répartie de façon discontinue sur le corps, ce qui entraîne une variation de déplacement. Notons que, sur ce point encore, Liénard souligne une difficulté (comme pour les courants permanents) chez Larmor, et il signale également que cette difficulté n'existe pas dans la théorie de Lorentz. Un lecteur découvrant à cette occasion la théorie de Larmor en tire probablement une image très peu flatteuse. Dans sa conclusion, Liénard souligne néanmoins les voies que cette théorie laisse entrevoir :⁷⁵

On voit que les différentes parties du mémoire de M. Larmor ne sont pas sans présenter quelques contradictions. Nous croyons qu'il ne faut pas y attacher trop d'importance ; ce qu'il faut chercher dans le mémoire de M. Larmor et ce qui en fait le très grand intérêt, ce sont les vues originales qui, si elles ne donnent pas dès

74. L'hystérésis est un phénomène d'asymétrie : pour un aimant donné, si l'on impose une excitation extérieure, l'aimantation ne sera pas la même selon que l'excitation est imposée de façon croissante ou décroissante.

75. *Ibid.*, p. 364-5.

maintenant une explication des phénomènes entièrement satisfaisante, montrent du moins dans quelle voie on peut espérer y parvenir un jour. Nous citerons entre autres une théorie des raies spectrales, l'application du principe de Carnot à une démonstration a priori de la loi de Fresnel sur l'entraînement des ondes lumineuses, l'explication que l'inertie des ions, cause de la dispersion dans les diélectriques transparents, n'a pas d'influence appréciable sur la propagation des courants de conduction dans les conducteurs, etc.

La référence à Fresnel que fait Liénard est la tentative de Larmor pour expliquer l'entraînement partiel des ondes. Dans la théorie de ce dernier, on trouve le facteur 1/2 dans l'expression de la vitesse des ondes. C'est le facteur qui intervient si l'on considère la force électrique \mathbf{E} et non la force \mathbf{E}' comme le fait Lorentz.

Notes à l'académie des sciences

Sur la période qui nous intéresse, Liénard fait part de deux notes à l'Académie des sciences (qui sont aussi publiées dans le journal *L'Éclairage Électrique*). Ces deux notes sont toutes deux présentées devant l'Académie par Alfred Potier. La première, présentée en 1899, est intitulée « Au sujet d'une note de M. Pellat sur la polarisation des diélectriques ». ⁷⁶ Liénard reprend une question posée par Henri Pellat concernant les conséquences d'une théorie particulière des diélectriques. ⁷⁷ Reprenant un sujet qu'il connaît bien puisqu'il a déjà publié un article sur le comportement des corps polarisés, Liénard cherche à montrer que l'expression de l'énergie obtenue par Pellat : $W = \frac{1}{2}\Sigma MV$, où M est une charge électrique vraie, peut se retrouver par les lois de Coulomb. Il utilise deux raisonnements différents, celui de Poisson et celui de Helmholtz, pour montrer ce résultat.

La seconde note est publiée en 1902, et porte « Sur l'application des équations de Lagrange aux phénomènes électrodynamiques et électromagnétiques ». ⁷⁸ Liénard corrige une conclusion d'Emmanuel Carvallo, examinateur de mécanique à Polytechnique, concernant l'application des équations de Lagrange à la résolution mathématique de la roue de Barlow (voir figure

76. Liénard 1899.

77. Henri Pellat (1850-1909). Professeur à la Sorbonne, titulaire à partir de 1899, il est l'auteur d'un mémoire « Électrostatique non fondée sur les lois de Coulomb », dans lequel il remarque notamment que la théorie de la polarisation fictive des diélectriques, qui consiste à introduire une couche fictive d'électricité pour expliquer le comportement d'un champ dans lequel se trouvent des diélectriques de nature différente, donne le même résultat que les autres théories. Voir : Pellat 1896.

78. Liénard 1902.

12.1).⁷⁹ Liénard montre que, la roue étant en mouvement, un terme supplémentaire dans la dérivée doit être considéré car le courant remonte selon une direction qui n'est pas fixe par rapport au référentiel terrestre. Il conclut en vérifiant que les équations sont bien applicables à ce cas particulier.

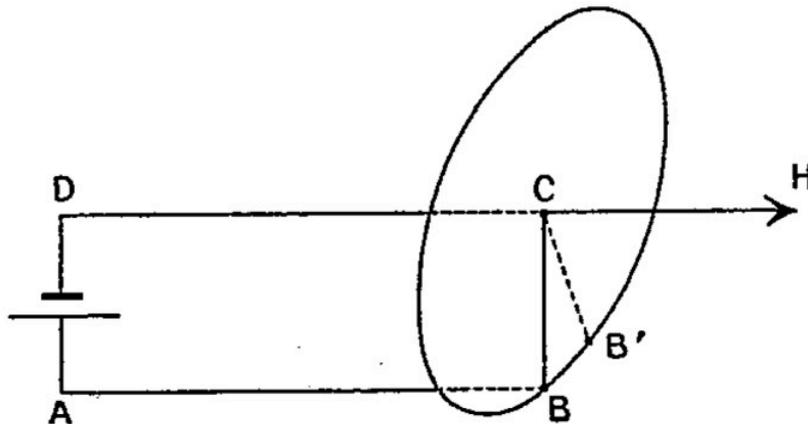


FIGURE 12.1 – Schéma du dispositif de la roue de Barlow (tiré de Liénard 1902). Un circuit électrique est formé d'un générateur et d'une roue métallique, reliée par deux fils en son centre et à son bord. En pratique le fil arrive dans un bain de mercure (conducteur) sur lequel la roue affleure, ce qui lui permet de tourner en gardant le contact électrique. Le tout est plongé dans un champ magnétique. Lorsque le courant circule, la roue subit une force de Laplace $\mathbf{j} \wedge \mathbf{B}$ et entre en rotation. Sur le schéma, la roue tourne autour de l'axe (CH), le courant circule selon (ABCD), qui se transforme en (ABB'CD) à cause de la rotation.

« *Champ électrique et magnétique produit par une charge électrique concentrée en un point et animée d'un mouvement quelconque* » (*EE, XVI, 1898*, pp. 5-14 ; 53-9 ; 105-12)

Dans cet article en trois parties publié en juillet 1898, Liénard affiche dès le titre son objectif : donner les expressions des champs électrique et magnétique produits par une charge ponctuelle isolée, et dans le cas d'un mouvement général. La considération d'une charge ponctuelle fait probablement suite aux travaux de J.J. Thomson et à la détermination par Lorentz du quantum électrique, comme nous l'avons déjà évoqué. Cet article très mathématique est différent des articles traitant de la théorie de Lorentz ou de Larmor, qui avaient une visée explicative. Ici, il s'agit d'un article « de recherche » dans lequel Liénard fournit une production

79. Pour des précisions sur Emmanuel Carvallo, voir : Walter 2007, p. 104.

propre. Et si la « force de Liénard » n'a pas résisté à la théorie de la relativité, un élément central de cet article fera passer Liénard à la postérité : les potentiels de Liénard-Wiechert.⁸⁰ La démonstration moderne classique (non-relativiste) de ces potentiels, ainsi que le calcul des champs, sont donnés en annexe (Annexe n° 15), et nous ne reproduirons pas ici les nombreux calculs que Liénard donne dans son article. Nous commenterons seulement certains points de son raisonnement. Après avoir établi l'expression des potentiels et des champs associés, Liénard utilise ces formules pour quatre applications que nous développerons.

Le premier point porte sur la façon dont Liénard obtient la formule du potentiel. Il commence par donner les équations relatives au champ, équations qui sont celles données par Lorentz dans le vide, avec un courant de conduction qui est directement $\mathbf{j}_1 = \rho \mathbf{v}$ pour une charge isolée :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E} = \rho \\ \nabla \cdot \mu_0 \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \wedge \mathbf{H} = \rho \mathbf{v} + \frac{\partial \epsilon_0 \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \wedge \mathbf{E} = -\frac{\partial \mu_0 \mathbf{H}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (12.13)$$

Les équations de propagation sont des équations de d'Alembert avec termes sources :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{E} = \nabla \left(\frac{\rho}{\epsilon_0} \right) + \mu_0 \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} \\ \left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{B} = -\mu_0 \nabla \wedge (\rho \mathbf{v}) \end{array} \right. \quad (12.14)$$

Pour résoudre ces équations Liénard utilise la méthode générale en faisant intervenir des potentiels, Φ et \mathbf{A} tels que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{A} = -\mu_0 \rho \mathbf{v} \end{array} \right. \quad (12.15)$$

Les champs s'expriment alors simplement :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \Phi \\ \mathbf{B} = \nabla \wedge \mathbf{A} \end{array} \right. \quad (12.16)$$

80. Emil Wiechert (1861-1928), physicien et géophysicien allemand, donnera l'expression de ces mêmes potentiels deux ans plus tard, apparemment de façon indépendante.

Les potentiels étant définis à une constante près, on ajoute la condition supplémentaire (condition de jauge) pour vérifier l'équation $\nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E} = \rho$:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{A} = 0$$

Reprenons la démonstration pour le potentiel scalaire (que Liénard établit par le calcul, et qu'il adapte ensuite au potentiel vecteur). Du fait de la propagation des actions (voir figure 12.2) le potentiel créé par la particule en un point $M(\mathbf{r}, t)$ est dû à la présence de la particule en un point $P(\mathbf{r}', t')$, où t' est *l'instant retardé* :

$$t' = t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{c}$$

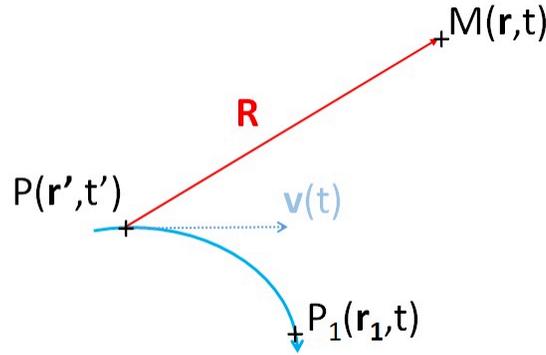


FIGURE 12.2 – Schéma des potentiels retardés (tiré de Liénard 1898 b, p. 6. Les notations vectorielles sont nôtres). Le point M est le point auquel nous souhaitons obtenir le potentiel à l'instant t . La flèche bleue pleine représente la trajectoire de la particule. Le point P_1 est la position de la charge à l'instant t , le point P est la position de la particule à l'instant retardé t' . La flèche en pointillés représente la vitesse de la particule à l'instant t' .

Liénard utilise la formule générale des potentiels retardés, donnée par Lorentz dans son mémoire de 1892 :

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho\left(\mathbf{r}', t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{c}\right)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV$$

L'intégration est prise sur tout l'espace. Posons $\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$ le vecteur entre le point P d'émission de l'onde et le point M considéré. Alors le potentiel s'exprime par :

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left[R - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{R}}{c}\right]_{ret}} \quad (12.17)$$

L'indice *ret* signifie que la quantité entre crochets est à prendre à l'instant retardé t' .

Mais pour une charge ponctuelle, la démonstration moderne (voir annexe) fait intervenir des distributions (notamment la fonction de Dirac), outils dont ne dispose pas Liénard à l'époque. Il doit donc trouver un moyen d'appliquer cette formule des potentiels retardés à une charge ponctuelle. Pour y parvenir, il considère une charge répartie en volume, et dont il prend ensuite la limite. Dans les unités adaptées, $\Phi = \int \frac{\rho}{r} dV'$.

Il suppose une charge suffisamment petite pour que la position (en particulier le vecteur \mathbf{R}) et la vitesse puissent être considérées comme constantes sur le volume de la particule, noté Ω . Liénard regarde le volume infinitésimal balayé pendant dt par une surface élémentaire de la charge. Dans le cas d'un mouvement quelconque, la valeur serait dV . Mais cet élément de volume doit être pris dans le référentiel de déplacement de la charge ou, ce qui est équivalent, par rapport au déplacement de l'onde émise. Il obtient donc :

$$dV' = dV \left[1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{R}}{c} \right]$$

Si la vitesse est orthogonale au vecteur directeur de l'onde, elle n'a aucune influence sur le volume balayé par la surface élémentaire. De même, si la particule se dirige dans la direction de l'onde avec une même vitesse c , elle a un déplacement relatif qui est nul. Comme l'intégration se fait sur toute la charge, le champ d'intégration n'est plus Ω mais :

$$\Omega' = \frac{\Omega}{1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{R}}{c}}$$

Il obtient ainsi l'expression de Φ , puis du potentiel vecteur \mathbf{A} . La première vérification de Liénard porte sur la condition de jauge.

Liénard calcule ensuite l'expression des champs électrique et magnétique. Reprenons les expressions sous leur forme moderne, en posant $\mathbf{n} = \mathbf{R}/R$ le vecteur directeur de l'onde et \mathbf{a} l'accélération de la particule :

$$\begin{cases} \mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \frac{1 - v^2/c^2}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}/c)^3} \left(\mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R c^2} \frac{1}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}/c)^3} \mathbf{n} \wedge \left[\left(\mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \wedge \mathbf{a} \right] \\ \mathbf{B} = \frac{1}{c} \mathbf{n} \wedge \mathbf{E} \end{cases} \quad (12.18)$$

Le premier terme, proportionnel à $1/R^2$ est dominant en champ proche. Il correspond aux actions électrostatiques. Ce terme est dirigé selon le vecteur directeur \mathbf{R} , il est radial, comme

un champ électrostatique. On remarque sur ce terme une correction en v/c , qui est due aux mêmes raisons que les aberrations des étoiles, à savoir la vitesse finie de propagation de l'onde. Le second terme, proportionnel à $1/R$ est le terme de champ lointain correspondant aux actions électromagnétiques. À grande distance, c'est ce terme, orthogonal à \mathbf{R} , qui domine, le champ électrique est donc transverse. La formule pour le champ magnétique est la relation de structure pour une onde plane transverse, ce qui est ici une coïncidence : à longue distance l'onde se comporte effectivement comme telle, mais à courte distance le champ électrique est radial.

Il est intéressant de constater que pour les champs Liénard commence à utiliser le formalisme vectoriel. Il écrit d'ailleurs ces expressions sous une forme légèrement différente, en les séparant en deux composantes : l'une selon le vecteur $\left(\mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c}\right)$, l'autre selon l'accélération \mathbf{a} . Il cherche dans un premier temps à retrouver les relations de Maxwell : la forme même de \mathbf{B} , orthogonal à \mathbf{n} indique que le flux à travers une surface fermée est nul, soit $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$. La relation $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$ est déduite du calcul. Les deux dernières relations entre \mathbf{E} et \mathbf{B} découlent de la définition des potentiels.

La première application de Liénard est le cas d'un cercle en rotation portant une charge linéaire. Il traite ce cas en sommant simplement les contributions de chaque partie infinitésimale du circuit. Dans ce cas, il montre que le résultat est équivalent à une distribution circulaire de courant $\rho\mathbf{v}$ où \mathbf{v} est la vitesse linéaire du cercle.

Le second point que Liénard aborde est la perte d'énergie rayonnée par la charge. Il considère le vecteur représentant le flux d'énergie $\mathbf{E} \wedge \mathbf{B}/\mu_0$, et montre que pour un surface sphérique centrée sur la charge le flux d'énergie est proportionnel à $\int E_n^2 dS$, où E_n est la composante radiale de \mathbf{E} . Or comme E_n est proportionnel à $1/R^2$, l'intégrale tendrait vers 0 aux temps longs, c'est-à-dire lorsque R tend vers l'infini. La quantité d'énergie perdue par la charge ne peut donc pas être déterminée ainsi. Pour éviter cet écueil, Liénard considère deux surface d'ondes S et S' correspondant à un même temps t , et émises à des temps t' légèrement différents. L'énergie comprise entre ces deux surface d'ondes est alors constante, et elle est entraînée à l'infini, donc perdue par la charge.

En faisant le calcul, Liénard établit la formule de la puissance rayonnée par une charge accélérée :⁸¹

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{2}{3} \frac{q^2}{c} \frac{1}{1 - v^2/c^2} \left[a^2 + \frac{(\mathbf{a} \cdot \mathbf{v})^2}{1 - v^2/c^2} \right]$$

81. Le facteur $\frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2}$, égal à l'unité chez Liénard, n'apparaît pas. Sur la question des unités et du facteur 4π voir : Heaviside et Lodge 1892.

En posant $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{v}/c$ et $\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$, on obtient ce qui est aujourd'hui la formule de puissance rayonnée pour une charge relativiste :

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2}{3} \frac{q^2}{c} \gamma^6 \left[\dot{\boldsymbol{\beta}}^2 - (\dot{\boldsymbol{\beta}} \wedge \boldsymbol{\beta})^2 \right]$$

Liénard peut comparer son résultat à celui obtenu par Larmor dans le cas d'une charge avec une vitesse faible. Pour $v \ll c$, Liénard retrouve la formule de Larmor :

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{2}{3} \frac{q^2}{c} a^2$$

Liénard remarque sur ce point que le raisonnement de Larmor, calculant simplement la puissance traversant une surface fixe pendant une unité de temps, n'est plus applicable lorsque la charge a une vitesse importante, car la surface a bougé. D'où la nécessité pour lui de considérer deux surfaces d'ondes infiniment proches.

De la même façon, Liénard cherche ensuite à déterminer l'impulsion transmise par la charge au champ. Pour cela il considère une charge mise en mouvement à une certaine vitesse à $t = 0$ et stoppée à $t = \tau$. À tout temps, l'énergie émise par la charge sera contenue dans les sphères de rayon respectif t et $t + \tau$, centrées sur les positions initiales et finales du mouvement. Liénard reprend l'expression de l'impulsion communiquée à une charge par le champ $\mathbf{p} = \int \epsilon_0 \mathbf{E} \wedge \mathbf{B}$, qu'il donnait dans son article précédent (voir page 389). Il considère que l'impulsion transmise par la charge au champ, et donc aux ondes émises, est de signe contraire. En calculant la valeur de cette impulsion, il trouve la relation :

$$d\mathbf{p} = \frac{dE}{c^2} \mathbf{v}$$

Liénard montre ainsi que l'énergie comprise entre les deux surfaces d'ondes se comporte comme ayant une inertie E/c^2 . Cette relation entre inertie et énergie est aujourd'hui une relation de base de la dynamique relativiste. Les travaux de Liénard à cette époque sont bien sûr à comprendre dans un cadre non relativiste, mais il faut souligner que Poincaré (entre autres) a lu ces articles.⁸²

Le troisième point que Liénard aborde est la force exercée sur lui-même par un corps de petites dimensions. Pour ce cas particulier, il se restreint à un mouvement rectiligne, mais qui

82. Les scientifiques pensent alors que l'inertie de l'électron est purement électromagnétique, par des effets de self-induction, et qu'il n'a pas de masse propre. D'où cette idée d'associer aux champ une densité de masse. Wien voudra tout réduire à cette vision en 1900. Einstein généralisera à toute forme d'énergie (tout en faisant une démonstration sur la base... de l'électromagnétisme). Voir la conférence de Wien de 1900, également présente dans le recueil offert à Lorentz pour son jubilé. Wien 1900.

n'est pas forcément uniforme. Dans son raisonnement, Liénard considère un corps sphérique chargé uniformément en volume. Chaque élément infinitésimal de charge de produit alors un champ électromagnétique qui exerce une force sur les autres éléments de charge. En intégrant sur tout le volume, il obtient (au premier ordre en v/c) la résultante des forces exercée par la boule sur elle-même, soit :

$$\mathbf{F} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{4}{5} \frac{e^2}{R_0} \mathbf{a}$$

Pour arriver à ce résultat Liénard utilise l'énergie potentielle électrostatique d'une boule. Il conclut en remarquant que cette force constitue « l'inertie électrique de la sphère ».

Mais le raisonnement de Liénard nous semble approximatif, et il commet plusieurs erreurs. La première est la définition de la force électrique exercée par un élément de charge sur un autre. Pour la calculer Liénard raisonne ainsi : un élément de charge de crée en un point un potentiel, donc un champ, calculé par la formule d'une charge ponctuelle. Ce champ exerce ensuite une force sur l'élément de charge de' . Tout d'abord, il utilise une formule établie dans le cas d'une charge isolée, cette approximation peut se justifier en considérant les éléments indépendants.

Ensuite il considère que la force exercée sur l'élément de charge de' est $de'\mathbf{E}$. Or les champs \mathbf{E} et \mathbf{B} que Liénard a calculés sont exprimés par rapport à un référentiel fixe. Et l'élément de charge se déplace dans ce champ, la force électrique ressentie n'est donc pas \mathbf{E} mais $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$, comme nous l'avons vu plus haut. Liénard donne cette expression pour la force ressentie dès son article de février 1898 sur la théorie de Lorentz.

En réalité cette approximation ne porte pas à conséquence. Reprenons l'expression du champ électrique créé par une charge isolée :

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \frac{1 - v^2/c^2}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}/c)^3} \left(\mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R c^2} \frac{1}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}/c)^3} \mathbf{n} \wedge \left[\left(\mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \wedge \mathbf{a} \right]$$

Posons pour simplifier $E_1 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \frac{1 - v^2/c^2}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}/c)^3}$. Avec les notations habituelles on a :

$$\mathbf{E} = E_1 \left(\mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) + \frac{R E_1 \gamma^2}{c^2} \mathbf{n} \wedge \left[\left(\mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \wedge \mathbf{a} \right]$$

Dans le cas d'un mouvement rectiligne, la vitesse et l'accélération sont colinéaires. Posons $\mathbf{a} = \alpha \mathbf{v}$. Le champ magnétique est égal à :

$$\mathbf{B} = -E_1 \left[1 + \frac{\alpha R \gamma^2}{c^2} \right] \left(\mathbf{n} \wedge \frac{\mathbf{v}}{c} \right)$$

Le terme correctif dans la force électrique, égal à $\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$ est :

$$\mathbf{B} = E_1 \left[1 + \frac{\alpha R \gamma^2}{c^2} \right] \left(\left(\mathbf{n} \cdot \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \frac{\mathbf{v}}{c} - \frac{v^2}{c} \mathbf{n} \right)$$

Le terme dû au champ magnétique est donc d'ordre 2 en v/c par rapport au champ électrique. Lorsque Liénard calcule la résultante, il se limite à l'ordre 1 en v/c , cette omission n'a donc aucune influence.

Notons que Liénard semble faire tout son raisonnement sans penser aux transformations de la charge et des champs. Il fait une deuxième approximation lorsqu'il calcule la résultante des forces, et intègre les actions élémentaires sur tout le volume du corps, c'est-à-dire sur tous les éléments de charge de et de' . Liénard suppose également que la charge est uniformément répartie en volume. Or ce corps se déplace avec une certaine vitesse, et il est nécessaire de considérer une transformation de la charge. Étant donné que les éléments de charge sont fixes par rapport au référentiel en mouvement (le corps lui-même), on a simplement $\rho' = \rho \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)$, ce qui se simplifie en ne gardant que le premier ordre en v/c . Mais à aucun moment Liénard n'évoque cette subtilité.

La dernière application que Liénard approfondit est le cas de particules se déplaçant avec une vitesse supérieure à celle de la radiation, application que nous détaillerons pas ici.

La perception des travaux de Liénard

Le rôle d'Alfred Liénard en électromagnétisme est resté connu par le nom attribué aux potentiels dûs à une charge ponctuelle. Mais au delà de la formule des potentiels, ses travaux n'ont qu'une reconnaissance assez faible. Dans un article de 1905 « Sur l'origine des radiations et l'inertie électromagnétique » publié dans le *Journal de Physique*, Paul Langevin parle de travaux qu'il a présentés en 1903 au Collège de France, et dont il dit dans son introduction avoir « depuis retrouvé une partie dans les publications de M. Liénard », citant les articles de l'*Éclairage Électrique*. C'est en fait la seule mention de Liénard dans cet article et, bien que Langevin refasse complètement le calcul des potentiels et des champs pour une charge ponctuelle, il ne donne aucune autre référence à Liénard.⁸³

L'exposé au Collège de France auquel Langevin fait référence est probablement le cours qu'il a donné en tant que suppléant de Marcel Brillouin, alors titulaire de la chaire de physique générale mathématique. Au programme du second semestre pour l'année 1902-1903, on trouve « Théorie de l'électrostatique, du galvanisme, et de l'induction dans les systèmes

83. Langevin 1905.

animés d'un rapide mouvement de translation, d'après les Mémoires de M. Lorentz (français 1892, allemand 1895, anglais 1900), de M. Liénard, et de M. Poincaré ». Langevin présente particulièrement le mémoire de Wilhem Wien de 1900 sur l'inertie électromagnétique.⁸⁴

L'impression est la même sur l'un des sujets que Liénard évoque à la fin de son article, à savoir les particules plus rapides que la vibration produit (ici la lumière). Ces particules hypothétiques sont aujourd'hui nommées les *tachyons*. Dans son article sur l'histoire du concept de tachyon,⁸⁵ l'historien de sciences Olof Fröman donne les premières hypothèses de J.J. Thomson et Georges Searle mettant en avant une divergence de l'énergie lorsque l'une particule ponctuelle s'approche de la vitesse de la lumière. Surtout, il détaille les premiers travaux d'Oliver Heaviside qui, dans un article paru dans la revue *The Electrician*, pointe le fait que la singularité disparaît lorsque la particule est considérée comme étendue, et non ponctuelle. Liénard n'est évoqué à aucun moment, bien que lui-même traite de ce cas de figure la même année que Heaviside.⁸⁶

Parmi les articles de physique, les potentiels de Liénard-Wiechert sont régulièrement mentionnés, et adaptés selon les théories. Les occasions exceptionnelles comme les anniversaires de découvertes de certains phénomènes sont parfois l'occasion de dresser un bref historique des grands contributeurs. C'est le cas avec un article traitant de l'histoire du rayonnement synchrotron, rayonnement des charges accélérées étudié dans les accélérateurs de particules. Dans son article de 1997 sur les 50 ans de l'observation du rayonnement synchrotron, le physicien John Blewett met en avant Liénard comme le premier à avoir calculé ce rayonnement, et évoque l'article que nous avons détaillé.⁸⁷

Les informations qu'il donne sont néanmoins légèrement erronées. Tout d'abord il mentionne Liénard en 1898 comme professeur à la « toujours prestigieuse École des Mines de Paris », propos véridiques sur le rayonnement de la-dite école mais pas sur le poste de Liénard, à l'époque à Saint-Étienne. Concernant le calcul en lui-même, les propos de Blewett ne sont pas clairs sur l'introduction des potentiels retardés, il évoque une application de ces potentiels, mais ne mentionne pas Lorentz, qui les a introduits.⁸⁸ On peut donc se demander

84. Collège de France 1902. Le mémoire en question de Wien est évoqué plus haut en note (voir p. 406).

85. Fröman 1994.

86. L'article de Heaviside en question, dont le titre n'est pas donné, est publié dans *The Electrician*, vol. XL (1898), 379-380.

87. Blewett 1998. Le rayonnement synchrotron est notamment étudié au grand centre français situé à Saclay, SOLEIL (acronyme de « Source Optimisée de Lumière d'Énergie Intermédiaire du LURE », où le LURE est le Laboratoire d'Utilisation du Rayonnement Électromagnétique, situé à Orsay.

88. *Ibid.*, p. 1 : « *The first major step forward, so far as we are concerned, was made in 1898 when Alfred Liénard, a professor at the still prestigious École des Mines in Paris, applied the concept of what are now called 'retarded potentials'.* ».

s'il n'attribue pas à Liénard la paternité de ces potentiels. Concernant le lien entre Liénard et le rayonnement synchrotron, l'auteur évoque la formule donnant l'énergie rayonnée, « telle qu'elle apparaît maintenant dans les articles actuels ». ⁸⁹ Il ne mentionne pas Larmor, qui le premier a donné la formule dans le cas $v \ll c$, ce qui peut se comprendre lorsque l'on s'intéresse aux rayonnements de haute énergie.

D'autre part, Blewett estime « chanceux » que Liénard ait trouvé cette formule sans la théorie de la relativité, cela étant dû d'après lui à l'invariance des équations électromagnétiques selon les référentiels en mouvement. Cette assertion nous semble erronée sur deux points. Le premier porte sur l'invariance des équations : dans la théorie de Lorentz que Liénard utilise, les équations ne sont absolument pas invariantes, preuve en est de la nécessité de la force de Liénard. L'invariance n'est valable qu'au premier ordre. Le second point porte sur la méthode même de Liénard : il n'utilise à aucun moment les transformations dans des référentiels en mouvement. Il y a un seul référentiel fixe, donc Liénard n'a pas besoin de composition relativiste des vitesses, il calcule simplement le champ créé dans ce référentiel par une charge en mouvement. Il n'utilise pas la transformation de la charge ou des champs, et comme nous l'avons vu cette omission n'a pas d'influence au premier ordre en v/c .

Conclusion

La vision que donne Liénard à travers ses différentes publications est particulièrement intéressante, car elle recouvre plusieurs aspects. Ses articles de diffusion sur les théories de Lorentz et de Larmor sont bien construits et relativement clairs, bien qu'il ne précise pas toujours les étapes intermédiaires de ses raisonnements. Ils sont largement accessibles à des lecteurs ayant un niveau mathématique suffisant, sans être nécessairement très haut. Les résumés que Liénard fait de ces théories permettent de donner une idée précise des hypothèses, en particulier du rôle de l'éther, qui apparaît notamment chez Lorentz comme un référentiel privilégié avant tout, et sans aucune essence matérielle. D'autres articles marquent une volonté de recherche et d'approfondissement de certaines notions plus complexes. À l'image d'un Poincaré, dont il est proche, Liénard utilise les théories pour développer certains points, comme le calcul de potentiels qui laissera son nom au panthéon de l'électromagnétisme.

Les articles théoriques en question laissent de côté les explications et la volonté de transmettre, pour se concentrer sur des éléments mathématiquement et physiquement redoutables,

89. *Ibid.*, p. 2 : « *just as it now appears in modern papers on synchrotron radiation* ».

qui semblent parfois échapper à Liénard. En publiant de tels articles, Liénard souhaite-t-il se mettre en avant dans l'optique d'un poste plus prestigieux, qu'il demande dès ses débuts ? Ou est-ce uniquement par passion désintéressée que cet ingénieur, enseignant et chercheur cherche à développer certains points théoriques ? La nature de ces articles semble pousser pour la seconde hypothèse, tant il serait difficile de faire valoir ces références particulièrement théoriques pour obtenir un poste d'enseignant en électricité. Mais Liénard, à qui Poincaré offre une possibilité de publication, souhaite dès ses débuts quitter la province et atteindre les cercles parisiens.

Conclusion de la troisième partie

Dans la presse française de la fin du XIXe siècle, toutes les informations pour se former aux théories électromagnétiques de l'éther sont accessibles, bien qu'elles soient parfois difficiles à trouver. Selon ses compétences, un lecteur peut se tourner vers différents types de sources. En premier lieu, les journaux spécialisés dans le domaine de la physique, comme le *Journal de Physique* ou le *Bulletin de la SFP*, publient régulièrement des articles sur ces sujets. Mais ces articles sont de bon niveau et ne cherchent pas à expliquer simplement les notions employées. Un journal comme la *Revue générale des sciences* permettra au lecteur de se faire une idée de ces notions, notamment en résumant les comptes rendus d'académies savantes de façon plus accessible. Des journaux plus généralistes ne fourniront pas d'articles traitant de ces sujets.

Parmi les titres dédiés à l'électricité, deux se détachent par leur orientation. Le *Bulletin de la SIE* publie ponctuellement des articles de bon niveau, dans lesquels les propos sont volontairement explicités pour des ingénieurs en électricité. Surtout, le journal *La Lumière Électrique*, qui paraît à partir de 1879, subit une lente transformation d'un journal dédié à l'électricité vers un journal de physique. À partir de 1889, sous l'influence d'Henri Poincaré et du « groupe Sorbonne », on constate la publication régulière d'articles visant à expliquer les nouvelles théories électromagnétiques (Maxwell, Hertz, Lorentz, ...). Ces articles restent néanmoins accessibles à un lectorat possédant un niveau mathématique suffisamment élevé, correspondant notamment aux profils d'anciens élèves des écoles que nous avons détaillées dans la partie précédente.

Henri Poincaré reste d'ailleurs un acteur majeur de cette diffusion. D'une part, les cours qu'il donne à la Sorbonne sont publiés à une large échelle et deviennent des ouvrages de référence. Tout comme les articles du journal *La Lumière Électrique* qui s'en inspirent, ces cours restent néanmoins d'un niveau mathématique assez élevé. Poincaré s'illustre aussi par des ouvrages plus philosophiques, qu'il destine à un public plus large.⁹⁰ D'autre part, en tant qu'ancien élève de Polytechnique et de l'école des Mines et directeur scientifique du journal *La Lumière Électrique*, il facilite probablement la publication d'articles rédigés d'autres anciens élèves de l'X. C'est notamment le cas pour Alfred Liénard, ingénieur des Mines, qui publie entre 1894 et 1898 tous ses articles dans le journal en question. Ces articles s'inscrivent pleinement dans la ligne éditoriale du journal : certains ont une visée pédagogique évidente, dans lesquels Liénard cherche avant tout à détailler pas à pas le raisonnement de Lorentz ; d'autres sont de véritables articles de recherche, ne sont accessibles qu'à des lecteurs suffisamment entraînés et proposent des avancées particulièrement importantes, dont le premier

90. Rollet 1996, p. 126.

calcul précis du potentiel pour une charge ponctuelle en mouvement, auquel Liénard a donné son nom.

Conclusion générale

La première difficulté que nous avons rencontrée dans notre sujet est le rôle même de « l'éther ». Sur l'ensemble des théories que nous considérons, il remplit des fonctions très différentes. Chez Maxwell, l'éther est le milieu de propagation mécanique de la perturbation, que le Britannique représente en utilisant un modèle dans ses premiers travaux. Bien qu'il abandonne ensuite son modèle pour une formulation lagrangienne, lui permettant de s'affranchir du mécanisme inconnu de propagation, Maxwell garde l'idée d'un éther qui est le siège des énergies cinétiques et potentielles. Par nature, la dynamique lagrangienne de Maxwell place au centre du raisonnement le potentiel vecteur \mathbf{A} , qui est pour lui l'impulsion — au sens lagrangien — du champ. La polarisation est un concept primordial, et la charge électrique est une discontinuité de cette polarisation, ou, comme le décrit Faraday, la terminaison des lignes de force. Le courant électrique est le taux de variation de cette polarisation.

Après avoir réalisé une preuve expérimentale déterminante pour la théorie de Maxwell, Heinrich Hertz établit sa propre théorie. Il part pour cela des résultats de Maxwell, qui sont les équations du champ. Il met de côté certains concepts maxwelliens qu'il juge trop difficiles ou trop flous, comme le déplacement électrique, et donne la primauté aux forces électrique et magnétique. La charge électrique n'est qu'une grandeur définie mathématiquement (comme le flux de force électrique), de même que le courant électrique (comme la circulation de force magnétique). Ces principaux traits sont d'ailleurs déjà présents dans les travaux d'un physicien britannique, Oliver Heaviside, maxwellien convaincu. En mettant au premier plan les forces, Hertz met de côté le rôle mécanique de l'éther, mais celui-ci reste le milieu de propagation qui accueille l'ensemble des phénomènes électriques et magnétiques, et dont les propriétés peuvent être modifiées localement par la présence de matière. Lorsqu'il cherche à décrire l'électrodynamique des corps en mouvement, Hertz suppose l'éther complètement entraîné par la matière, ce qui lui permet de conserver les mêmes équations (en changeant uniquement une dérivée partielle en dérivée totale), mais ne peut vérifier les phénomènes optiques comme l'entraînement partiel.

Prenant le contrepied de Hertz, qui n'accorde aucune valeur « concrète » à la charge, le néerlandais Hendrik Lorentz introduit en 1892 des particules de matière portant la charge électrique. Cette rupture ôte à l'éther un caractère important, qui est justement celui de contenir la charge électrique. Elle permet de plus d'établir un lien, un couplage, entre la matière, qui porte dorénavant la charge électrique, et l'éther, qui propage les forces. Ce couplage est nécessaire pour expliquer les phénomènes optiques comme l'entraînement partiel ou la dispersion. Les particules de matière se déplacent dans un éther parfaitement immobile : ce dernier constitue donc un référentiel privilégié, référentiel d'écriture des équations du champ, et n'a pas besoin d'être « substantiel ». Son unique rôle de référentiel l'écarte progressivement de la définition que nous avons initialement donnée pour l'éther, comme substance capable de propager des actions factuelles ou potentielles.

L'explication des phénomènes optiques a un revers : la théorie de Lorentz ne vérifie pas le principe de réaction, cher à Henri Poincaré, s'il est appliqué à la matière seule. Une résultante des forces demeure, ce qui pose un problème dans la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Pour l'expliquer, il faut considérer l'éther. Mais comment attribuer une quantité de mouvement à un éther qui reste immobile ? Un début de solution est apporté par Poincaré en introduisant une densité de quantité de mouvement pour le champ, qui devient peu à peu un objet physique.

Le physicien irlandais Joseph Larmor, reprenant une théorie optique plus ancienne due à William MacCullagh, propose un mécanisme pour l'éther électromagnétique. Mais ses idées se heurtent à l'expérience, en particulier celle de Lodge sur les disques en rotation. Ce point résume bien l'évolution des théories autour de l'éther sur tout le XIXe siècle : des modèles variés, que ce soit pour l'optique (Fresnel, Cauchy, MacCullagh, ...) ou l'électromagnétisme (Maxwell, Lodge, Thomson, Larmor, ...), doivent coexister avec des résultats expérimentaux, notamment sur l'entraînement de l'éther (aberrations stellaires, prisme d'Arago, expérience de Fizeau, expérience de Michelson et Morley, expérience de Lodge, ...) qui semblent non moins disparates.

Aux différentes questions que nous avons posées dans notre introduction et qui ont guidé notre réflexion, nous pouvons apporter une première réponse : toutes les informations sur ces théories apparaissent dans des cours et des moyens de diffusion dédiés à la physique et à l'électricité... mais de façon très inégale. Avant de rentrer dans le détail, nous pouvons dresser un bilan général. Certains établissements (instituts et écoles) enseignent ces théories assez tôt, dès les années 1880, que ce soit dans les cours de physique ou ceux d'électricité ; d'autres ne les prennent en compte que tardivement.

L'essor de l'électricité industrielle, principalement à partir des années 1880, influe sur le paysage académique en entraînant la création d'écoles dédiées à l'industrie ou à l'électricité. Par conséquent, il existe pour la formation des ingénieurs ou des techniciens de nombreux établissements, largement différents, allant du système polytechnicien aux instituts électrotechniques universitaires, en passant par des grandes écoles civiles comme Centrale ou l'École Municipale de Physique et Chimie Industrielles. Il est nécessaire de considérer toutes ces formations, qu'elles proposent des cours de physique ou des cours d'électricité.

Au moment de la première Exposition Internationale d'Électricité en 1881, une première génération d'écoles, comme l'École Supérieure de Télégraphie (1878) ou l'École Municipale de Physique et Chimie Industrielles (1882) voient le jour, de même que l'Institut Montefiore à Liège (1883). Ces établissements, que nous avons désignés comme les « nouvelles écoles » intègrent naturellement l'électricité dans leurs enseignements dès leurs débuts. Les établissements plus anciens, comme Centrale ou le Conservatoire des Arts et Métiers, ne l'intègrent officiellement qu'à partir de 1890, même si l'enseignement de l'électricité était déjà présent à titre officieux. Le constat est le même pour les écoles d'applications de Polytechnique, comme l'École des Mines qui ne crée des cours d'électricité qu'à partir de 1887-1888. Concernant l'École Polytechnique elle-même, la différence est encore plus nette, puisque Polytechnique se refuse à intégrer l' « électricité », qui appartient au domaine des sciences appliquées, et la délègue aux-dites écoles. Elle privilégie dans son enseignement l'aspect théorique des phénomènes électromagnétiques, en évoquant à peine leurs applications.

Quelles sont les connaissances que les élèves acquièrent sur ces théories et sur l'éther pendant leur formation académique ? Les théories des années 1890 (Hertz, Lorentz) sont trop récentes pour être enseignées, même dans les cours postérieurs à 1895. Les expériences de Hertz sont néanmoins présentes dans presque tous les cours dès leur réalisation. Concernant la théorie de Maxwell, son arrivée est disparate, tant sur les dates que sur les motivations.

Dans ces jeunes écoles, les idées de Maxwell sont abordées dans les cours d'électricité. Si elles ne représentent souvent qu'une petite partie, vue comme un complément (Cours d'Éric

Gérard à Liège, cours de Hospitalier à l'EMPCI), la théorie de Maxwell occupe parfois la place centrale du cours (cours d'Aimé Vaschy à l'EST). Le rôle de l'éther comme siège de l'énergie électromagnétique y est assez bien décrit. Dans les établissements civils plus anciens, comme Centrale ou le Conservatoire des Arts et Métiers, la théorie de Maxwell n'est pas enseignée. À Centrale, le modèle mécanique du Britannique est présent, ce qui donne directement une représentation « sensible » de l'éther. Mais la description qui en est faite ne donne pas une vision assez large des idées de Maxwell. D'autres établissements, comme l'École Supérieure d'Électricité ou l'Institut électrotechnique de Grenoble — qui naît des efforts de Paul Janet —, offrent une approche uniquement tournée vers la pratique de l'électricité, sans considérer les théories électromagnétiques.

La théorie de Maxwell n'apparaît dans le système polytechnicien qu'à partir de 1893. Elle est introduite à Polytechnique dans le cours de physique par Alfred Potier, le cours étant repris ensuite par Henri Becquerel. Les notions spécifiques à Maxwell y sont très rapidement évoquées et ce sont principalement les équations qui sont données. Dans ce cours de physique, l'éther est avant tout considéré dans le domaine de l'optique. Lorsqu'il est évoqué, c'est comme support de la lumière dans la théorie ondulatoire de la lumière (sans qu'un mécanisme particulier, comme l'éther de Fresnel, ne soit développé). Dans la partie relative aux idées de Maxwell la question du milieu n'est pas développée, sauf pour donner la conclusion de Maxwell selon laquelle l'éther « est aussi le véhicule des actions électriques ».⁹¹ Dans les écoles d'application, ces aspects théoriques ne sont pas abordés, et ne sont pas utilisés dans la description des dispositifs.

En plus des connaissances acquises durant la scolarité, l'établissement de formation des élèves permet de situer leur niveau mathématique. Ce point est important dans le cadre de la diffusion des connaissances via les journaux ou les bulletins de sociétés. Dans ces périodiques, certains articles s'adressent explicitement aux électriciens, en simplifiant les présentations, mais d'autres se placent à un niveau formel particulièrement élevé, même lorsqu'ils constituent des articles de diffusion et non de recherche. Dans ce cas, les compétences mathématiques du lecteur vont différer : un ancien élève de Polytechnique, rompu aux mathématiques, aura les bases nécessaires pour comprendre les équations même s'il n'a jamais étudié la théorie en question auparavant ; à l'inverse, un élève issu d'un institut électrotechnique, dont la formation aura été axée sur l'électricité appliquée, ne pourra pas forcément suivre des articles trop formels.

Dans les différents moyens de diffusion — journaux, bulletins et ouvrages — on trouve

91. Becquerel 1897, p. 493.

tous les éléments pour comprendre la théorie de Maxwell. Il en est de même pour les nouvelles théories comme celles de Hertz ou Lorentz. Les cours donnés à la Sorbonne par Henri Poincaré représentent des ouvrages de référence, qui expliquent précisément les théories en question. Ces cours ont une large diffusion (y compris à l'étranger) grâce à leur publication. Le livre *Électricité et Optique*, publié en plusieurs volumes, aborde la théorie de Maxwell dès 1890, celle de Helmholtz l'année suivante, puis les nouvelles théories de Hertz et Lorentz en 1901. Le niveau assez mathématique de ces ouvrages est compensé par la pédagogie de Poincaré, utilisant de manière récurrente les analogies.

Mais le moyen de diffusion le plus large reste la presse scientifique. Dans les journaux spécialisés dans la physique (*Journal de Physique*, *Bulletin de la Société Française de Physique*), les articles sur la théorie de Maxwell et l'éther électromagnétique sont réguliers. Dans les revues qui traitent des sciences théoriques en général (*Revue générale des sciences*), les articles sont moins courants mais les informations passent beaucoup par la publication de notes des sociétés savantes, comme l'Académie des Sciences en France, la *Royal Society* pour les travaux des physiciens britanniques ou l'Académie des Sciences d'Amsterdam pour ceux de Lorentz. Ces notes donnent en général des idées assez précises, au moins sur les fondements des théories auxquelles elles se réfèrent. D'autre part, les bibliographies présentes dans ces revues permettent aux lecteurs de connaître les ouvrages publiés dans les domaines qui les intéressent.

Dans les journaux spécialisés dans le domaine de l'électricité, il y a au contraire très peu d'articles qui traitent de points théoriques. Le *Bulletin* publié par la Société Internationale des Électriciens, société dont font partie beaucoup de physiciens, intègre quelques articles sur la théorie de Maxwell ou sur les expériences de Hertz, mais les théories récentes ne sont pas présentes. Ces articles sont parfois rédigés spécifiquement pour un lectorat d'électriciens et non de physiciens, à l'image de l'article de Gustave Séligmann-Lui sur la théorie de l'électricité de Maxwell. Dans les journaux tournés vers l'électricité, comme *L'Électricien*, aucun article sur les théories électromagnétiques n'apparaît, et la nature de l'électricité est rarement discutée, sauf en référence à d'autres contributions comme le discours de William Preece commenté par Édouard Hospitalier, qui conclut que « l'électricité n'existe pas ».

Un journal électricien fait néanmoins exception, il s'agit de *La Lumière Électrique*, créé en 1879. Débutant comme un journal technique, il publie quelques articles théoriques à partir de 1884-5. Il est surtout le moyen de diffusion privilégié d'un groupe qui s'organise à partir de 1889, groupe constitué de jeunes enseignants et préparateurs à la Sorbonne (certains sont rédacteurs des cours de Poincaré), qui publient des articles avec une réelle volonté de

diffusion, en expliquant les théories les plus récentes. Ces articles, qui s'étalent parfois sur dix numéros consécutifs, constituent de véritables cours par correspondance pour un lectorat souhaitant se former. Le changement de nom (et de propriétaire) du journal, qui devient en 1894 *L'Éclairage Électrique*, ne fait qu'accélérer le processus avec notamment l'arrivée officielle de Henri Poincaré parmi les contributeurs.

En 1897, le journal prend une tournure encore plus significative, en dévoilant une direction scientifique composée des professeurs de physique les plus renommés, direction dont Poincaré fait officiellement partie. De plus en plus d'articles théoriques (effet Zeeman, rayons Röntgen, ...) sont publiés, déplaçant les informations plus techniques (bilans de compagnies électriciennes) vers le supplément, qui devient présent pour tous les numéros. C'est au sein de cette « nouvelle version » du journal qu'Alfred Liénard s'illustre en 1898, en publiant les deux premiers articles de diffusion relativement complets sur la théorie de Lorentz (sur ses travaux de 1892 puis ceux de 1895), ainsi qu'un article de recherche calculant les potentiels et les champs créés par une charge ponctuelle.

La contribution d'Alfred Liénard permet de souligner un aspect particulier de l'essor de l'électricité industrielle. Les exemples de travaux théoriques ayant mené à des applications industrielles sont nombreux : l'expérience d'Ørsted, les travaux d'Ampère sur les courants et les expériences d'induction de Faraday furent à l'origine du développement des machines électro-mécaniques, les travaux de William Thomson sur la propagation électrique permirent l'amélioration des câbles télégraphiques, et de façon plus tardive les expériences de Hertz initièrent la télégraphie sans fil. Mais l'article de Liénard, qui est un article de recherche publié dans un journal électricien né de la dynamique industrielle de l'électricité, illustre une sorte de rétroaction positive de l'industrie sur le développement de la recherche. Un autre exemple est donné par le Congrès des Électriciens, motivé par la tenue de l'Exposition Internationale d'Électricité de 1881, auquel les plus grands physiciens participent et qui aborde notamment la question des unités, point à la fois pratique et théorique.

Les journaux dédiés à l'électricité permettent également d'avoir, notamment avec la publication de correspondances ou d'éditoriaux, un retour sur l'idée que les spécialistes de l'électricité se font de l'éther. Le sentiment le plus répandu reste une incompréhension par rapport à la diversité des idées sur l'éther. Mais parmi les lecteurs (notamment les ingénieurs), certains ne se contentent pas de nier l'éther, ils critiquent de façon plus générale la vision qui est donnée de l'électricité, trop abstraite, et cherchent à proposer d'autres idées. Notons qu'au sein de la communauté britannique, le sentiment d'incompréhension est encore plus développé, les ingénieurs faisant face à de nombreux articles sur l'éther et ses modèles

publiés par les physiciens. Cette multitude de modèles, outre les questionnements, entraîne parfois les railleries.

Dans les cours d'électricité de certaines écoles, ainsi que dans certains journaux, on observe dès 1890 une utilisation du mot « champ » comme désignant la force (magnétique ou électrique) en elle-même et plus seulement une partie de l'espace. Cette utilisation, faite en général lors de la description des phénomènes électromagnétiques et des dispositifs, s'associe parfois aux expressions de « composantes du champ », lui donnant un caractère vectoriel, voire à une loi de composition des champs. La vision du « champ » comme objet physique (qui se retrouve en partie dans le mémoire de Poincaré de 1900) est largement anachronique. Mais il faut souligner qu'en termes de langage, le « champ » des ingénieurs désigne, dès les années 1890, les forces électriques et magnétiques, il peut s'additionner et se décrire par un vecteur.

À la fin du XIXe siècle, la théorie de Lorentz bénéficie d'une large renommée, notamment pour ses explications des découvertes de Pieter Zeeman sur les raies d'émission et celle de Joseph John Thomson sur l'existence de particules chargées. Dans cette théorie, l'éther est avant tout un référentiel fixe dans lequel s'écrivent les équations du champ. L'arrivée, en 1905, de la théorie de la relativité restreinte pousse Albert Einstein, diplômé de l'École Polytechnique Fédérale de Zurich et expert technique au bureau des brevets à Berne, à considérer l'éther comme « superflu ». À la même époque, un autre type de transmission commence à voir le jour, la transmission hertzienne, ou télégraphie sans fil, à laquelle restera attachée le nom de l'un de ses protagonistes : Guglielmo Marconi. Ce dernier se base sur les expériences que Hertz a réalisées en 1887 pour vérifier des prédictions de la théorie de Maxwell. Ce domaine de la télégraphie sans fil, qui se trouve au confluent de la physique, des mathématiques et de la technologie, serait particulièrement intéressant à aborder selon les méthodes que nous avons développées dans ce travail.

Annexes

Annexe n°1 : L'« électricité » et les phénomènes électriques aux XVIIe et XVIIIe siècle

William Gilbert

William Gilbert (1544-1603) étudie au collège St John de Cambridge avant de devenir médecin. L'apogée de sa carrière arrive avec sa nomination en tant que médecin personnel de la reine Elizabeth et président du Collège Royal des Médecins. Ses travaux personnels l'amènent à publier deux ouvrages, *De Magnete* (1600) et *De mundo nostro sublunari philosophia nova* (1651). Il est le premier à avoir utilisé le terme « électriques » pour désigner les corps capables, lorsqu'ils sont frottés, d'attirer des objets légers (paille, papier, ...). Le terme provient du mot *electron*, terme de grec ancien pour désigner l'ambre jaune, chez qui cette propriété avait été observée dès l'Antiquité. Gilbert caractérise l'action électrique comme « violente » mais « non attractive », car le corps électrique ne se déplace pas. À l'inverse, le magnétisme est mutuel et non-violent. Cette différence avait d'ailleurs déjà été introduite par Girolamo Cardano,⁹² comme le signale Heilbron :⁹³

Cardano reconnaissait cinq distinctions : (1) l'ambre attire de nombreux types de corps, la magnétite seulement le fer ; (2) l'attraction entre magnétite et fer est mutuelle, contrairement à l'effet de l'ambre ; (3) la magnétite, contrairement à l'ambre, agit à travers des objets interposés ; (4) les aimants poussent seulement par ses pôles, l'ambre partout et (5) la force de l'ambre est affectée par une friction

92. Girolamo Cardano (1501-1576), astrologue et mathématicien italien resté célèbre pour la « méthode de Cardan » permettant de résoudre les équations polynomiales de degré 3.

93. Heilbron 1979, p. 174.

et une chaleur douces, qui n'affectent pas les aimants. Ces observations sont précises et, à l'exception de la deuxième, correctes. Gilbert les acceptait toutes, et en ajouta lui-même trois : un aimant pousse des poids plus lourds que l'ambre ne peut ; l'humidité d'une surface ou de l'atmosphère inhibe l'action électrique mais pas magnétique ; et la propriété attractive de l'ambre appartient à une large variété de substances, contrairement à celle de la magnétite.

La principale contribution de Gilbert repose sur le dernier point, à savoir la caractérisation des différents corps « électriques ». Pour repérer l'électricité des corps, Gilbert utilise un instrument inventé par Girolamo Fracastoro, un *versorium*, une aiguille métallique utilisée initialement pour montrer que l'ambre attirait également le métal. Avec cet instrument, Gilbert ajoute à la liste des corps électriques le verre, la cire, la résine ou encore le soufre.

Au niveau théorique, Gilbert considère que l'attraction électrique est liée à l'humidité. Il reprend en ce sens la théorie d'Aristote dans laquelle chaque corps possède deux humeurs, l'une fluide et humide, l'autre solide et sèche. Pour Gilbert, c'est le caractère humide qui est le vecteur de l'attraction électrique, qui se comporte comme une effluve, de la même façon que deux corps mouillés s'attirent à cause de la tension de surface. Cette vision de l'électricité lui permet de justifier pourquoi les corps électriques ne peuvent attirer de flamme, et pourquoi les effets diminuent lorsque l'air ambiant est humide (l'humidité de l'air « colmate » les pores à la surface des corps).⁹⁴

Hauksbee et Gray

Francis Hauksbee, expérimentateur en chef à la Royal Society à partir de 1703, met en place des expériences pour montrer les effets de l'électricité à un auditoire nombreux. Utilisant un dispositif impressionnant (voir figure 12.3) pour électriser les corps, il lance la mode des expériences « à grande échelle » en électrostatique.

Hauksbee s'intéresse notamment au phénomène de phosphorescence du mercure, en fait l'apparition de lumières bleutées dans un baromètre au mercure lorsque le baromètre est secoué. Dans un premier temps, il se débarrasse du vide en montrant que les lueurs persistent même si une certaine quantité d'air est admise (d'après Heilbron les lueurs proviennent en fait des molécules d'air raréfié). Après des expériences avec des feuilles de laiton ou des morceaux de carbone, avec lesquels il observe que les particules peuvent être mises en mouvement par

94. *Ibid.*, p. 177.

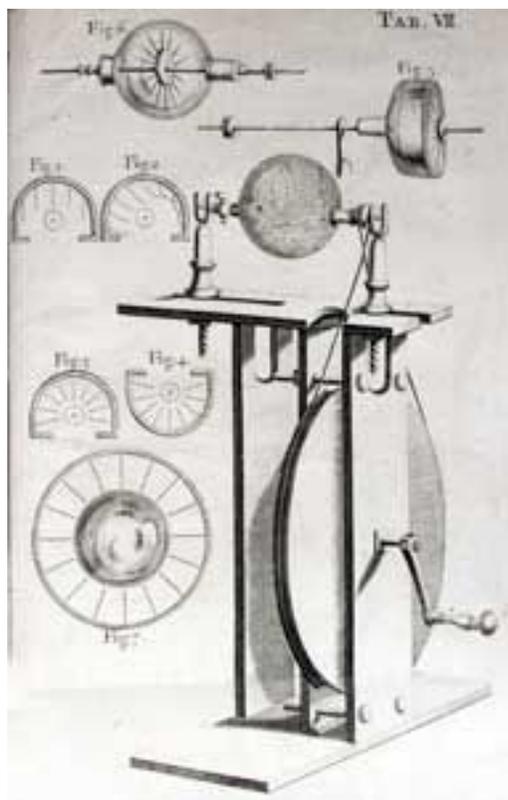


FIGURE 12.3 – Prototype de la machine électrique d’Hauksbee. Tiré de Heilbron 1979, p. 232 (également dans Heilbron 1982, p. 170).

les corps électriques, Hauksbee étudie l’influence d’un cylindre de verre électrisé sur des bouts de laine, situés à l’extérieur puis à l’intérieur du tube. Il constate que les bouts ont tendance à s’aligner selon les rayons, ce qui l’amène à relier ce phénomène à la gravitation universelle de Newton, nouvellement promue. Néanmoins son hypothèse d’une « effluve attractive » est remise en cause par le fait qu’en approchant sa main des fils de laine, ceux-ci s’éloignent, qu’ils soient à l’extérieur ou à l’intérieur du tube de verre, pourtant générateur de l’effluve. Hauksbee modifie sa théorie en arguant que l’effluve n’est pas un vent mais plutôt des supports droits, pouvant traverser le verre et supporter des objets légers.⁹⁵

Les idées de Hauksbee sont contredites par Stephen Gray, autodidacte issu d’une famille de teinturiers, et contributeur occasionnel aux *Philosophical Transactions*. En 1708, Gray envoie au secrétaire de la *Royal Society* Hans Sloane une note sur des expériences réalisées sur

95. Pour des détails sur les machines utilisées en électrostatique voir également : C. Blondel, B. Wolff ; Des machines à frotter. <http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/18e/machine/>

l'électricité. Ne disposant pas des moyens matériels de Hauksbee, Gray réalise ses premières expériences avec des plumes en lieu et place des feuilles d'or ou de laiton. Il constate ainsi que la plume, lorsque lâchée sur un tube de verre frotté, remonte et flotte légèrement au-dessus de celui-ci.

La contribution de Gray à l'électricité est en plus limitée par des considérations personnelles de membres de la *Royal Society*, où Hauksbee utilise — ou omet, selon son intérêt — les conclusions de Gray sans le nommer. Gray lui-même considérait ses chances d'être reconnu en électricité comme faibles, lui préférant l'astronomie, mais c'est bien dans ce premier domaine qu'il réalise une avancée majeure. En 1729, après avoir échoué à électriser des métaux par frottements, Gray réussit à les électriser « par induction », en rapprochant un tube de verre chargé. De plus, Gray met en avant une « communication d'électricité » : avec un tube de verre bouchée aux extrémités par du liège, une plume lâchée sera attirée par ce dernier, et non par le tube. Il interprète ceci par « une communication de la vertu attractive du tube au liège ». ⁹⁶

Les électricités de Dufay

Charles-François de Cisternay du Fay naît à Paris en 1698. Issu d'une famille de bonne noblesse, il s'engage dans l'armée et participe à la guerre d'Espagne de 1718. Il quitte ensuite le domaine militaire pour se consacrer aux sciences, avec un certain succès puisqu'il entre à l'Académie royale des Sciences en 1723 en tant qu'adjoint expérimentateur en chimie, avant d'en occuper le poste de directeur dix ans plus tard.

En 1733, Dufay publie une série de mémoires sur l'électricité. Il réitère dans un premier temps l'expérience de répulsion d'une feuille d'or par un tube de verre, la feuille se mettant à flotter au-dessus du tube après l'avoir touché. Dufay cherche alors à savoir si deux corps électrisés impliquent toujours le même effet. En rapprochant de la feuille un morceau de gomme résineuse, il constate que la feuille est attirée par la gomme à sa grande surprise. Il se résout à supposer l'existence de deux électricités distinctes, l'électricité résineuse pour les corps comme la gomme, la cire, la soie ou le papier, alors que l'électricité vitreuse apparaît bien sûr sur le verre ou le cristal, mais également sur la plume ou la laine. La « loi de Dufay » peut s'exprimer ainsi : deux corps chargés de la même électricité se repoussent, et deux corps s'attirent si les électricités sont contraires.

96. Heilbron 1982, p. 172.

L'électricité unique de Franklin

Benjamin Franklin, né à Boston en 1706, et considéré comme l'un des pères fondateurs des États-Unis, est notamment resté célèbre dans le domaine de la physique pour l'invention du paratonnerre. Fils d'un fabricant de chandelles, Franklin s'initie à la physique à l'adolescence en fréquentant les cercles érudits de Philadelphie, qui reçoivent des instruments envoyés d'Angleterre, dont des « machines électriques », i.e. des machines permettant d'électriser un tube de verre en actionnant une manivelle.

Ses premières observations l'amènent à reconsidérer la notion d'électricité. Franklin constate en effet que le tube de verre chargé peut être transmis, sans se décharger, à d'autres personnes tant que celles-ci se trouvent isolées de la Terre (en pratique sur un socle de cire). Il introduit ainsi l'idée d'un « feu électrique » contenu en chacun, et dont on peut ôter ou ajouter une quantité. Une personne A frottant le tube de verre lui transmet une partie de ce feu électrique. Étant isolée du « magasin » terrestre par la cire, elle reste avec « moins » d'électricité tandis que le verre en a « plus ». Cet excès peut ainsi être transmis à une personne B, également isolée. Ainsi, l'individu A est dit chargé négativement, et B chargé positivement.

Annexe n°2 : L'éther dans la théorie de Fresnel

Augustin Fresnel, physicien français du début du XIXe siècle, est le grand artisan de la théorie ondulatoire de la lumière et, malgré une courte carrière, a largement contribué à la faire adopter. Ancien élève de l'École Polytechnique (X 1804), Fresnel est nommé ingénieur des Ponts et Chaussées à partir de 1808.

Les aberrations stellaires

S'intéressant à l'optique, il remarque dès 1814 que le phénomène des aberrations stellaires peut s'expliquer sans se baser sur une théorie de la lumière en particulier. Fresnel montre que « l'aberration », qui consiste à voir une étoile à une position décalée de sa position réelle, est uniquement due au mouvement de la Terre et à la vitesse finie de la lumière. En effet, si l'on suppose que l'on pointe avec un télescope la position exacte (i.e. calculée) d'une étoile dans le ciel (repérée par la direction OP sur la figure 12.4), et que la lunette n'est percée qu'en P, le temps fini mis par la lumière pour traverser la lunette entraîne un déplacement de l'oculaire O jusqu'à la position O', déplacement dû à la vitesse de la Terre. Il en résulte que, pour observer en O' l'étoile, il est nécessaire de viser une direction apparente, décalée d'un angle $\delta\theta = v/c$ par rapport à la position réelle. Jusqu'alors, les aberrations étaient présentées comme un argument en faveur de la théorie corpusculaire de Newton. L'explication en termes de vitesse finie de la lumière permet ainsi à Fresnel de se sentir plus libre d'avancer dans la voie d'une théorie ondulatoire.

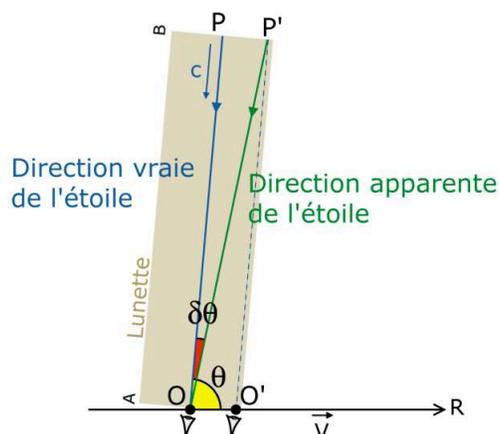


FIGURE 12.4 – Schéma représentant le phénomène d’aberration stellaire. Tiré de Bracco et Haspot 2015, p. 34.

La théorie ondulatoire

Dans son *Premier Mémoire sur la diffraction de la lumière* en octobre 1815, Fresnel établit les bases d’une théorie ondulatoire, pour expliquer le phénomène de diffraction. Il s’intéresse en particulier aux franges lumineuses présentes dans l’ombre géométrique d’un corps — en l’occurrence un fil d’environ 1 mm d’épaisseur. Fresnel remarque que les franges semblent prendre leur origine sur le bord de l’obstacle, et qu’elles ont une « trajectoire curviligne ». ⁹⁷ Plus important encore, les franges présentes dans l’ombre disparaissent si l’on obstrue la lumière provenant d’un des côtés du fil, ce qui montre que les franges « résultent donc du concours des rayons arrivant des deux côtés ». ⁹⁸

Les expériences sur les interférences, bien qu’amenées à un haut degré de précision par Fresnel — l’utilisation d’un micromètre lui permettra de mesurer des déplacements de franges jusqu’à $1/100^{\text{ème}}$ de millimètre — ne sont pas nouvelles. Les premières interférences lumineuses furent observées par Francesco Grimaldi au XVII^e siècle, qui avait également utilisé un fil. À l’aube du XIX^e siècle, Thomas Young, médecin et physicien anglais, développa plusieurs expériences d’interférences avec division du front d’onde, introduisant le dispositif connu sous le nom de « trous d’Young ». ⁹⁹ Le scientifique anglais reprocha d’ailleurs à Fres-

97. Fresnel remarque en fait que les franges sont distribuées sur des hyperboloïdes de révolution, ce qu’il retrouve par le calcul.

98. Fresnel 1866.

99. Dispositif d’interférences simplement constitué de deux trous. Les contraintes de cohérence imposent néanmoins un diamètre et un écart entre les trous du même ordre de grandeur que la longueur d’onde.

nel, après les premiers travaux de celui-ci, de n'avoir rien introduit de vraiment nouveau par rapport à ses propres avancées. Il reconnaîtra plus tard le mérite du Français, et le soutiendra pour l'obtention de la médaille du comte du Rumford.¹⁰⁰

Avec les conclusions de ces premières expériences, Fresnel remet sur le devant de la scène une théorie ondulatoire, développée par Christiaan Huyghens dès le XVII^e siècle. L'explication de l'aberration des étoiles en terme de vitesses avait déjà ôté à la théorie corpusculaire un argument majeur. Avec les expériences de diffraction, la principale critique d'une théorie ondulatoire, selon laquelle la lumière ne pouvait « contourner » un obstacle — comme par exemple le son peut le faire — n'est plus valable.¹⁰¹ Dans son premier mémoire, Fresnel donne également une explication pour la réflexion et la réfraction des ondes en terme d'ondes. Il en déduit une « conséquence absolument contraire à celle de Newton sur la vitesse relative de la lumière dans le verre et dans l'air », qui supposait comme Descartes une vitesse des particules de lumière plus grande dans le verre que dans l'air.¹⁰²

Dans le *Deuxième mémoire sur la diffraction*, déposé une semaine plus tard, Fresnel revient sur la disparition des franges lorsqu'un cache opaque est apposé sur l'un des côtés du fil.¹⁰³ Il se base sur cette observation pour affirmer l'existence d'un fluide permettant la propagation des ondes lumineuses : « Cette disparition, inexplicable dans l'hypothèse de Newton, confirme le système qui fait consister la lumière dans les *vibrations d'un fluide particulier* ». ¹⁰⁴ Dans un supplément à ce deuxième mémoire, publié en juillet 1816, Fresnel revient sur l'idée que les « centres d'ondulation » de la lumière seraient situés sur les bords de l'objet opaque. Les nouvelles expériences effectuées — en particulier l'observation des franges au micromètre — l'amènent à considérer que chaque point atteint par l'onde lumineuse incidente se comporte comme une source d'ondes secondaires sphériques, ce qui est aujourd'hui appelé « principe de Huyghens-Fresnel ». Il développe une « théorie des rayons efficaces » qui lui permet de calculer la somme des contributions de toutes ces sources secondaires.¹⁰⁵ Le calcul formel et complet développé dans un troisième mémoire — le mémoire couronné qui remporte le prix que l'académie des sciences avait mis au concours en 1818 pour expliquer la diffraction — fait intervenir des intégrales nouvelles, appelées depuis « intégrales de Fresnel ».

100. Prix décerné depuis 1800 par la *Royal Society* à un scientifique européen. Parmi les lauréats français on retrouve notamment Étienne-Louis Malus, François Arago ou Louis Pasteur.

101. Le comportement de la lumière par rapport à un obstacle est notamment un argument avancé par Newton contre une théorie ondulatoire, en dépit de certaines expériences de Grimaldi.

102. Fresnel 1866, vol. I. pp. 9-35. et vol. III, p. 531.

103. Bracco 2004.

104. Fresnel 1866, vol. III, p. 534. Les italiques sont de Fresnel.

105. Bracco et Haspot 2015, p. 4.

L'entraînement partiel de l'éther

Dans le cadre de sa théorie ondulatoire, Fresnel suppose l'existence d' « un fluide universel agité par les mouvements rapides des particules de corps lumineux » et dont les vibrations constituent la lumière.¹⁰⁶ Cette hypothèse avait déjà été faite par Young : dans ses *Lectures* de 1801, qu'il fait sur « La théorie de la lumière et des couleurs », les deux premières propositions qu'il donne sont « 1) Un éther luminifère remplit l'univers, hautement élastique et ténu. » et « 2) Des vibrations sont excitées dans cet éther à chaque fois qu'un corps devient lumineux ». ¹⁰⁷

Ayant décrit la propagation de la lumière, se pose pour Fresnel la question du mouvement de ce milieu, notamment par rapport aux corps en mouvements. Le problème des aberrations stellaires, pour lequel Fresnel avait montré que seul le caractère fini de la vitesse de la lumière suffisait, revient d'ailleurs le questionner. En effet, si l'éther environnant la Terre était totalement entraîné par celle-ci, la lumière se propagerait toujours à la même vitesse pour un observateur à la surface terrestre. Les modulations annuelles observées dans les aberrations resteraient inexplicables. À l'inverse si l'éther était parfaitement immobile par rapport à la Terre, la vitesse de la lumière par rapport à la surface serait $c + v$ ou $c - v$ suivant que la Terre s'éloigne ou s'approche de la source, ce qui rendrait mieux compte des aberrations. Dans une lettre de 1816 à François Arago,¹⁰⁸ Fresnel écrit ainsi : « je n'ai pu, jusqu'à présent du moins, concevoir nettement ce phénomène qu'en supposant que l'éther passe librement au travers du globe, et que la vitesse communiquée à ce fluide subtil n'est qu'une petite partie de celle de la terre, n'en n'excède pas le centième par exemple ». ¹⁰⁹

Fresnel revient sur ce problème en 1818, lorsqu'Arago lui demande d'expliquer certaines de ses observations optiques en utilisant la nouvelle théorie ondulatoire. L'une des expériences d'Arago, réalisée en 1806 à l'Observatoire de Paris, consistait à regarder à travers un prisme — placé devant une lunette — la réfraction de la lumière de plusieurs étoiles à des jours différents, ce qui impliquait normalement une variation de la vitesse relative de la Terre par rapport à l'étoile. Dans la théorie particulaire de Newton, la vitesse de la lumière dépend de la particule. Si l'on conjugue la vitesse de la lumière avec celle de la Terre sur son orbite, la réfraction devrait donc varier d'un jour à l'autre. Or Arago n'observait aucun changement dans l'angle de réfraction, alors que la sensibilité de son dispositif était suffisante pour détecter

106. Fresnel 1866, vol. I, p. 249.

107. Young 1801, p. 14 et p. 16.

108. François Arago a largement contribué à l'essor des travaux de Fresnel, par exemple en lui donnant l'opportunité d'utiliser les laboratoires de Polytechnique, ou en rapportant ses mémoires devant l'Académie.

109. Fresnel 1866, vol. II, p. 627-36.

un effet au premier ordre en v/c dans la position du spectre d'une étoile. Ses mesures lui permettaient d'ailleurs de fixer des contraintes strictes sur les différences de vitesses des corpuscules lumineux, et mettaient en défaut la théorie corpusculaire.¹¹⁰

Pour expliquer une absence de modification de la réfraction, dans la théorie ondulatoire, il faudrait supposer un éther statique par rapport à la surface, donc complètement entraîné par la Terre. Or, comme nous l'avons vu, cette hypothèse entre en conflit avec les observations des aberrations. Fresnel se tourne alors vers l'hypothèse d'un entraînement partiel de l'éther, en supposant que le corps en mouvement communique à l'éther une fraction $1 - \frac{1}{n^2}$ de sa vitesse, où n est l'indice optique du milieu.¹¹¹

Prenons maintenant le cas d'un prisme dont la lumière incidente arrive selon la normale à la face d'entrée (voir figure 12.5). Dans le référentiel au repos, l'angle avec lequel la lumière émerge du prisme est donné par la relation $n \sin i = \cos \alpha$, où i est l'angle au sommet du prisme. En utilisant la théorie ondulatoire, cette relation s'obtient en considérant deux rayons parallèles, avec un plan d'onde (surface orthogonale aux rayons). Pour que le plan d'onde AB se retrouve en CD, le temps mis par la lumière à l'intérieur du prisme doit être identique à celui mis par la lumière à l'extérieur. En termes de chemin optique, cela donne : $nAD = BC$.¹¹²

Dans le cas du prisme en mouvement (entraîné par la Terre), Fresnel fait l'hypothèse que l'indice à l'intérieur du milieu en mouvement n'est plus n mais n' . Si la lumière sort du prisme en B, elle n'en sortira plus en D mais en D'. L'égalité des chemins optiques s'écrit alors $n'AD' = BC'$. En reprenant l'expression de c/n' donnée par l'entraînement partiel de l'éther (voir plus haut), Fresnel peut exprimer l'angle supplémentaire dû au mouvement du prisme comme $\delta\alpha = \frac{v}{c} \cos(\alpha + i)$. Or dans le cas d'un observateur à la surface de la Terre, cet effet est — au premier ordre en v/c — exactement compensé par le décalage dû aux aberrations. Fresnel en conclut « que le mouvement de notre globe ne doit avoir aucune influence sensible sur la réfraction apparente ». Il est important de remarquer que pour Fresnel, la relation de l'entraînement partiel de l'éther découle d'une relation mathématique rendant compte de l'absence d'un effet physique (le déplacement du spectre), qu'il interprète en terme d'entraînement partiel.¹¹³

Le coefficient d'entraînement partiel de Fresnel sera vérifiée expérimentalement par Hip-

110. Pour des précisions sur les expériences et les écrits d'Arago voir : Combes et Eisenstaedt 2011.

111. Pour le calcul voir : Darrigol 2000 (b), p. 434.

112. Un peu de trigonométrie : $\cos \alpha = \frac{BC}{BD}$ et $\sin i = \frac{AD}{BD} = \frac{\cos \alpha}{n}$. On retrouve bien sûr la relation de Snell-Descartes pour la réfraction.

113. Bracco et Provost 2014.

polyte Fizeau en 1851.¹¹⁴

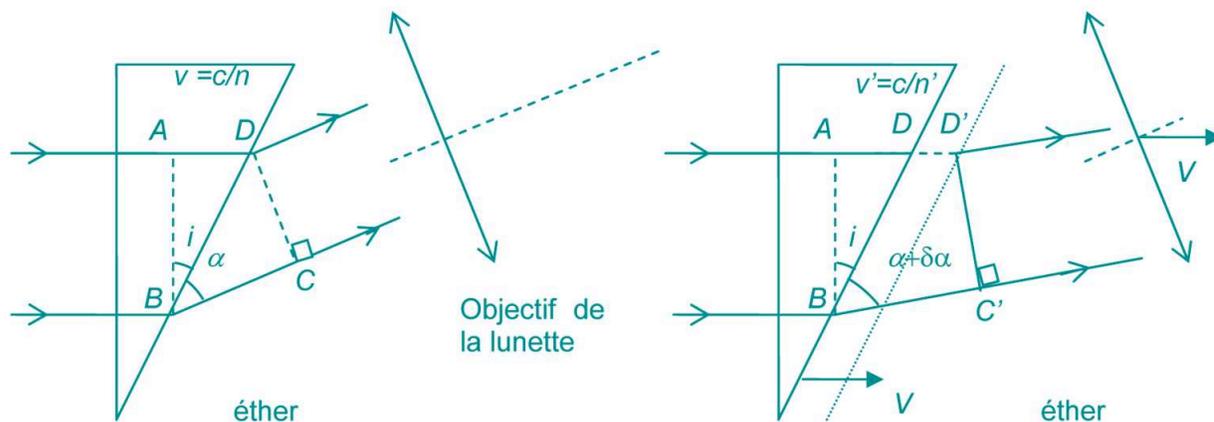


FIGURE 12.5 – Schéma du dispositif d'Arago, au repos et en mouvement. Tiré de Bracco et Provost 2014.

Transversalité de la lumière et éther

Une question reste néanmoins en suspens, celle des phénomènes de polarisation qu'Étienne-Louis Malus a observés en 1810 avec des cristaux de spath d'Islande.¹¹⁵ Fresnel et Arago s'intéressent alors aux interférences réalisées avec une lumière polarisée. En utilisant un dispositif de fentes d'Young, Fresnel observe :¹¹⁶

Les expériences que nous venons de rapporter conduisent donc en définitive aux conséquences suivantes :

1. Dans les mêmes circonstances où deux rayons de lumière ordinaire paraissent mutuellement se détruire, deux rayons polarisés en sens contraires n'exercent l'un sur l'autre aucune action appréciable.
2. Les rayons de lumière polarisés dans un seul sens agissent l'un sur l'autre comme les rayons naturels : en sorte que, dans ces deux espèces de lumières, les phénomènes d'interférences sont absolument les mêmes.

114. Voir annexe suivante

115. Malus 1810.

116. Bracco et Haspot 2015, p. 36.

3. Deux rayons primitivement polarisés en sens contraires peuvent ensuite être ramenés à un même plan de polarisation, sans néanmoins acquérir par là la faculté de s'influencer.
4. Deux rayons polarisés en sens contraires, et ramenés ensuite à des polarisations analogues, s'influencent comme les rayons naturels, s'ils proviennent d'un faisceau primitivement polarisé dans un seul sens.

Cette expérience, dite de Fresnel-Arago, met en avant l'importance de la polarisation sur la capacité de deux ondes à interférer. Fresnel fait en outre l'hypothèse que les mouvements dus à la polarisation sont transversaux, c'est-à-dire perpendiculaires aux rayons lumineux, et qu'il n'y a pas de composante longitudinale. Il justifie cette idée en montrant, le cas échéant, que l'image à travers un matériau anisotrope (Fresnel considère du spath d'Islande) serait indépendante de l'orientation du matériau.¹¹⁷

Pour expliquer la propagation d'une onde transverse à travers un milieu, Fresnel se base sur la conception (très répandue) d'un milieu élastique comme d'un ensemble de particules exerçant entre elles des forces attractives. Il considère le modèle ci-dessous, dans lequel les particules exercent des forces attractives dépendant de la distance, et sont disposées en couches. Deux couches successives sont décalées l'une par rapport à l'autre :

Afin d'étudier la propagation d'une perturbation transverse, Fresnel suppose que toutes les couches au-dessus de AB sont décalées, et regarde l'influence sur cette dernière. En pratique, il considère de façon réciproque un déplacement latéral de la couche AB — pour laquelle le point M passe dans la position m —, toutes les autres couches étant immobiles. Il prend la force d'interaction de la forme $\phi(r)$, où r est la distance entre deux particules. En utilisant les symétries, il montre que les composantes différentielles selon l'axe y se compensent, et que seules les composantes selon x s'additionnent. Si une couche est déplacée latéralement, elle exerce à son tour une action tangentielle sur la suivante.

Concernant la nature des contraintes dans le milieu, Fresnel insiste sur le caractère « non-contigu » des particules du milieu. Pour lui, si le milieu était parfaitement contigu, les couches successives ne pourraient se déplacer latéralement les unes par rapport aux autres, alors qu'elles pourraient propager un mouvement de compression. Avec son modèle, « on peut donc supposer que la résistance de l'éther à la compression est beaucoup plus grande que la force qu'il oppose aux petits déplacements suivant leurs plans ». ¹¹⁸

117. Fresnel 1866, vol. II, p. 431-2.

118. Fresnel 1866, vol. II p 435.

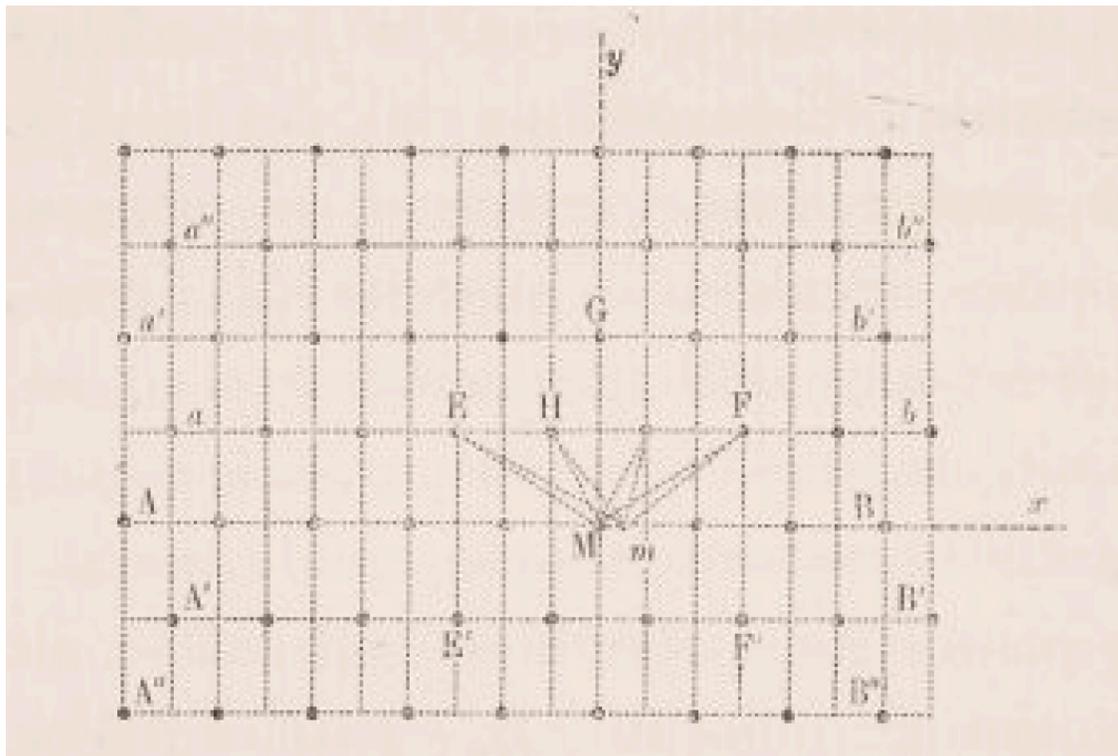


FIGURE 12.6 – Modèle d'un éther élastique permettant la propagation de mouvements transverses. Tiré de Fresnel 1866, vol. II, p. 432.

Annexe n°3 : Les expériences de Fizeau

Hippolyte Fizeau (1819-1896) est sans conteste l'un des physiciens dont le nom reste invariablement attaché à la vitesse de la lumière. Soutenu par Arago, dont il suit les cours à l'Observatoire de Paris, Fizeau est élu membre de l'Académie des Sciences en 1860. Ses différentes expériences permettent alors d'approcher la valeur de la vitesse de la lumière.

Mesure par une roue dentée

Réalisée en 1849 dans sa maison familiale à Suresnes, la première expérience de Fizeau donne une valeur pour la vitesse de la lumière de 315 300 km/s.¹¹⁹

Une source de lumière (de la craie chauffée au chalumeau) est disposée sur le côté d'une lunette, et déviée par une lame semi-réfléchissante dans l'axe de celle-ci. La lumière de la source est focalisée sur une roue dentée en rotation, entraînée par un poids. À Montmartre une autre lunette, équipée d'un miroir, renvoie la lumière vers la source primaire. Si la roue tourne suffisamment lentement, la lumière passant dans un intervalle à l'aller peut y passer également au retour. À l'inverse, si la vitesse de la roue est telle que la lumière, sur le retour, est obstruée par une dent, il est possible d'en déduire le temps mis pour faire l'aller-retour.

La distance du trajet, 8633 mètres, est connue par triangulation, de même que la vitesse de rotation de la roue grâce à un compteur. La roue possède 720 dents. Fizeau nous dit que la première éclipse survient pour une vitesse de rotation de 12,5 tours/s. Un calcul rapide donne : un écart angulaire entre la dent et le trou consécutif de $\frac{2\pi}{1440}$ rad ; un temps de rotation correspondant de $5,56 * 10^{-5}$ s et une vitesse pour la lumière de $3,11 * 10^8$ m/s.

En effectuant 28 observations, Fizeau en déduit une moyenne de « 70 948 lieues de 25 au degré », soit 315 300 km/s.

119. Pour ce paragraphe nous utilisons les supports réalisés à l'occasion d'une exposition à l'Observatoire de Paris, dont la page internet dédiée : <http://expositions.obspm.fr/lumiere2005/experiencefizeau.html>. Consulté le 16/08/2020.

Comparaison des vitesses par un miroir tournant

La deuxième expérience de Fizeau est à l'époque considérée comme une expérience cruciale pour décider entre les théories de l'émission ou des ondulations. Fizeau la réalise quelques mois après que Léon Foucault a fait une expérience similaire dans le cadre de sa thèse, ce qui entraîne une controverse — bien que Fizeau reconnaisse la priorité de Foucault.¹²⁰

Le principe est d'utiliser un miroir plan tournant autour d'un axe : la lumière fait un aller-retour entre ce miroir et un miroir fixe à une certaine distance ; le miroir ayant tourné — même légèrement — pendant le temps de l'aller-retour, l'image sera décalée par rapport à la source.

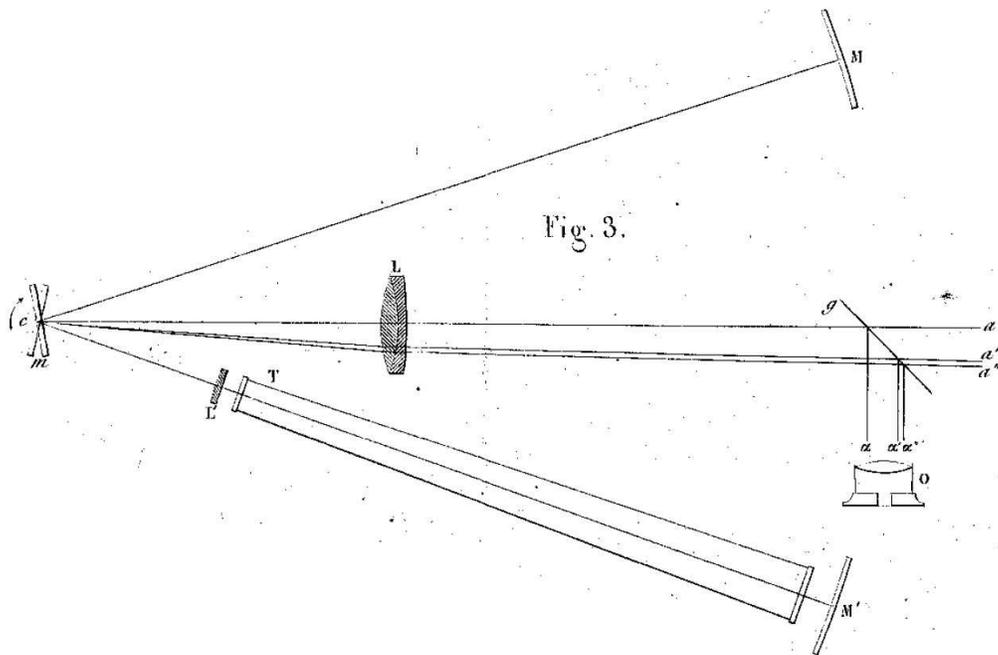


FIGURE 12.7 – Dessin du dispositif expérimental de l'expérience du miroir tournant. Le dessin est tiré de la thèse de Foucault (Foucault 1853) mais le dispositif utilisé par Fizeau est similaire.

Sur la figure 12.7, la source est située au point O. Une lame semi-séparatrice g permet

120. Bien que la thèse de Foucault, dans laquelle il explique cette expérience, ait été publiée en 1853, il apparaît que c'est bien lui qui a réalisé l'expérience environ six semaines avant Fizeau (voir Samuëli 2009, p. 8). Les deux dispositifs sont très similaires. Nous utilisons ici le mémoire de Fizeau pour décrire l'expérience. Pour le dispositif de Foucault, voir Foucault 1853 et Samuëli 2009.

de placer la source sur le côté. Fizeau utilise la lumière du soleil en ajoutant un prisme pour obtenir une largeur spectrale plus faible. Une lunette permet d'envoyer des faisceaux parallèles sur le miroir tournant (l'objectif est situé près du miroir tournant pour éviter des pertes). Le miroir tournant c envoie la lumière sur un premier miroir fixe M , miroir sphérique de centre situé au niveau du miroir tournant. Fizeau utilise ce dispositif en plaçant sur un autre bras une colonne remplie d'eau. Le temps de trajet étant différent dans l'eau et dans l'air, le miroir tournant aura une rotation différente et les deux images ne seront pas superposées.

Le point intéressant est le fait que Fizeau ne mesure pas les durées de trajet pour chaque bras, mais compare les chemins optiques.¹²¹ Dans la théorie de l'émission, la vitesse dans l'eau est supérieure à celle dans l'air d'un facteur $4/3$. Dans la théorie des ondulations, le rapport est inversé. En donnant au bras avec de l'air une longueur $4/3$ plus grande que celle du bras avec de l'eau, la position des images permettra de vérifier les vitesses relatives : si la vitesse est plus grande dans l'air, les images seront superposées ; si elle est plus faible les images ne le seront plus, celle à travers l'air étant plus décalée que celle à travers l'eau.

L'expérience est faite par Fizeau au sein de l'Observatoire de Paris, dans la salle aujourd'hui appelée salle Cassini. La vitesse du miroir est de 1500 tours/s, la colonne d'eau a une longueur de 2m et les images sont observées à une distance de 1,5 m. À cette distance, le décalage de l'image à travers l'air est d'environ 0,2 mm, et devrait être augmenter d'un facteur $4/3$ dans la théorie des ondulations. Avec la méthode de Fizeau consistant à régler les longueurs des bras pour égaliser les chemins optiques, il est plus simple de constater — ou non — la superposition des images. Les résultats de l'expérience confirme la supériorité de la vitesse dans l'air par rapport à l'eau, ce qui porte à cette époque un coup définitif à la théorie corpusculaire de Newton. On peut toutefois souligner ici que cette inférence est exagérée, et que cette expérience n'était pas nécessairement cruciale. Comme le souligne Jean-Jacques Samuëli, « ce résultat n'invalide que la modélisation de la réfraction dans la théorie corpusculaire ». ¹²²

En 1862, Foucault réalise à nouveau l'expérience avec un dispositif amélioré, en utilisant des réflexions successives pour augmenter la longueur du bras dans l'air, et donc l'angle de déviation. Il mesure une vitesse pour la lumière de 298 000 km/s.

121. Fizeau utilise le terme de « longueurs équivalentes ».

122. Samuëli 2009, p. 4.

Mesure du coefficient d'entraînement partiel de l'éther

La dernière expérience a pour but la confirmation d'une hypothèse sur la relation entre éther et matière ordinaire, à savoir qu' « une portion seulement de l'éther serait libre, l'autre portion serait fixée aux molécules du corps et partagerait seule ses mouvements ». Comme le souligne Fizeau, cette hypothèse a été introduite par Fresnel pour expliquer à la fois les aberrations stellaires mais également l'expérience du prisme d'Arago (voir annexe précédente). Elle permet également une vérification théorique du coefficient d'entraînement partiel de l'éther introduit par Fresnel.

Fizeau réalise cette expérience en 1851, en collaboration avec Léon Foucault.¹²³ Le but de l'expérience est de faire interférer deux faisceaux lumineux ayant traversé des milieux en mouvement — en l'occurrence de l'eau — dans des sens contraires. Pour cela, Fizeau utilise un double tube parcouru par un courant d'eau.¹²⁴ Dans chacun des tubes un faisceau lumineux est envoyé, qui sera dans le même sens, ou dans le sens contraire, que le mouvement de l'eau. L'utilisation de miroirs pour réfléchir les faisceaux et les faire revenir dans le tube opposé permet d'amplifier le phénomène :¹²⁵

Relativement au mouvement, on voit, au contraire, que les deux rayons sont soumis à des influences opposées. Si l'on suppose, en effet, que dans le tube situé à droite, de l'eau coule vers l'observateur, celui des deux rayons qui viendra de la droite aura parcouru le tube dans le sens du mouvement, tandis que le rayon venant de la gauche l'aura parcouru dans un sens contraire à celui du mouvement. En faisant mouvoir l'eau dans les deux tubes à la fois, et en sens contraire pour chacun d'eux, on voit que les effets doivent s'ajouter. Ce double courant étant produit, on peut encore en renverser le sens à la fois dans les deux tubes, et l'effet doit encore être doublé.

Les tubes possèdent un diamètre de 5,3 mm, et une longueur de 1,487 m. Avec une vitesse de l'eau de 7,069 m/s, les mesures donnent un décalage de 0,23 franges entre l'état au repos et celui en mouvement de l'eau (ce que Fizeau appelle « déplacement simple »). Lorsque l'on compare le déplacement des franges en changeant le sens du courant (« déplacement double »), la valeur attendue est donc de 0,46, et la mesure donne 0,40. Fizeau en conclut

123. Costabel 1987.

124. L'idée du double tube est reprise d'une autre expérience d'Arago, qui avait déjà utilisé le double tube avec de l'air sec d'un côté et de l'air humide de l'autre.

125. Fizeau 1851, p. 352.

que l'hypothèse de l'entraînement partiel est la plus probable.¹²⁶

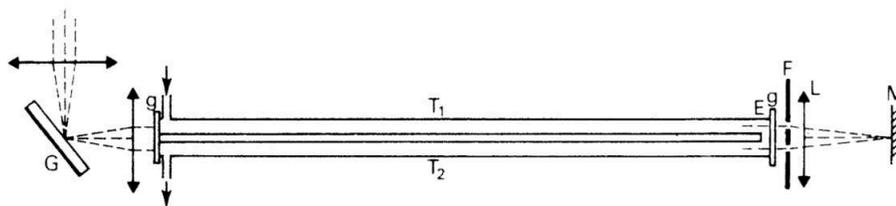


FIGURE 12.8 – Schéma du dispositif expérimental de l'expérience de l'entraînement dans l'eau.

126. Le déplacement double attendu des franges est bien sûr nul dans l'hypothèse d'un éther stationnaire, et il est de 0,92 pour un éther totalement entraîné. Avec les valeurs calculées par Fizeau on peut en déduire que la longueur d'onde utilisée est de 538 nm (pour un indice de l'eau de $n = 1,33$).

Annexe n°4 : Les équations de Maxwell

En formalisme moderne, les équations de Maxwell joignent les grandeurs vectorielles suivantes :

- \mathbf{E} : champ électrique,
- \mathbf{D} : déplacement électrique,
- \mathbf{B} : champ magnétique,
- \mathbf{H} : excitation électrique.

Les termes sources sont :

- ρ : densité volumique de charges libres,
- \mathbf{j} : courant de conduction,
- \mathbf{M} : aimantation (ou « magnétisation induite »).
- \mathbf{P} : polarisation électrique

La permittivité diélectrique du vide est notée ϵ_0 , la perméabilité magnétique du vide est notée μ_0 .

Les grandeurs sont reliées entre elles :

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \\ \mathbf{B} &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})\end{aligned}$$

Le milieu est supposé homogène (les constantes du milieu ne dépendent pas du point considéré) et isotrope (les constantes du milieu ne dépendent pas de la direction considérée).

Dans un milieu magnétique linéaire, l'aimantation \mathbf{M} est proportionnelle à l'excitation \mathbf{H} : $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$, où χ_m est la susceptibilité magnétique.

On peut alors écrire $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$ où $\mu_r = 1 + \chi_m$.

De la même façon, dans un milieu linéaire la polarisation électrique \mathbf{P} est proportionnelle à la force électrique \mathbf{E} : $\mathbf{P} = \chi_e \epsilon_0 \mathbf{E}$, où χ_e est la susceptibilité magnétique. On peut alors écrire $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$ où $\epsilon_r = 1 + \chi_e$.

Les équations du champ sont :

$$\begin{cases} \nabla \wedge \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} & ; \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho & ; \quad \nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{cases}$$

La conservation de la charge s'exprime par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$$

Dans le vide, l'équation d'onde pour le champ électrique s'écrit :

$$\Delta \mathbf{E} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

C'est une équation dite de d'Alembert, avec une vitesse caractéristique $c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$.

L'équation est identique pour le champ magnétique.

Le vecteur représentant la propagation d'énergie est le vecteur de Poynting : $\mathbf{\Pi} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \wedge \mathbf{B}$

Annexe n°5 : L'électrodynamique de Hertz

Avec les équations de Hertz pour l'électrodynamique des corps en mouvement, il est possible de retrouver toutes les forces mises en jeu dans les phénomènes électromagnétiques. Pour des raisons de cohérence, le raisonnement est fait dans les unités SI (avec $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ et $\mu = \mu_0\mu_r$).¹²⁷

Les quatre équations sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D\mu\mathbf{H}}{Dt} = -\nabla \wedge \mathbf{E} \\ \frac{D\epsilon\mathbf{E}}{Dt} = \nabla \wedge \mathbf{H} - \mathbf{j} \\ \nabla \cdot \epsilon\mathbf{E} = \rho \\ \nabla \cdot \mu\mathbf{H} = 0 \end{array} \right. \quad (12.19)$$

avec c la vitesse caractéristique, ρ l'électricité « libre » et \mathbf{j} le courant de conduction.

Rappelons les expressions des dérivées convectives :

$$\frac{D\epsilon\mathbf{E}}{Dt} = \frac{\partial\epsilon\mathbf{E}}{\partial t} - \nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \epsilon\mathbf{E}) + (\nabla \cdot \epsilon\mathbf{E})\mathbf{v} \quad (12.20)$$

$$\frac{D\mu\mathbf{H}}{Dt} = \frac{\partial\mu\mathbf{H}}{\partial t} - \nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mu\mathbf{H}) + (\nabla \cdot \mu\mathbf{H})\mathbf{v} \quad (12.21)$$

¹²⁷. Rappelons que Hertz utilise un système d'unités dans lequel les quantités \mathbf{E} et \mathbf{H} ont même dimension et les constantes ϵ et μ sont sans unité.

Considérons un milieu homogène et isotrope. L'expression de l'énergie électromagnétique par unité de volume est d'après Hertz :

$$e_{em} = e_e + e_m = \frac{1}{2}\epsilon\mathbf{E}^2 + \frac{1}{2}\mu\mathbf{H}^2 \quad (12.22)$$

En considérant l'énergie intégrée sur tout l'espace, la variation temporelle sera :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{em}}{\partial t} &= \int \frac{\partial\epsilon\mathbf{E}}{\partial t} \cdot \mathbf{E} + \frac{\partial\mu\mathbf{H}}{\partial t} \cdot \mathbf{H} dV \\ &= \int \left[\nabla \wedge \mathbf{H} - \mathbf{j} + \nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \epsilon\mathbf{E}) - (\nabla \cdot \epsilon\mathbf{E})\mathbf{v} \right] \cdot \mathbf{E} dV \\ &\quad + \int \left[-\nabla \wedge \mathbf{E} + \nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mu\mathbf{H}) - (\nabla \cdot \mu\mathbf{H})\mathbf{v} \right] \cdot \mathbf{H} dV \end{aligned} \quad (12.23)$$

Regroupons les termes dans l'intégrale :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{em}}{\partial t} &= - \int \left((\nabla \wedge \mathbf{E}) \cdot \mathbf{H} - (\nabla \wedge \mathbf{H}) \cdot \mathbf{E} \right) d\tau \\ &\quad - \int \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} d\tau \\ &\quad - \int \left((\nabla \cdot \epsilon\mathbf{E})\mathbf{E} \cdot \mathbf{v} + (\nabla \cdot \mu\mathbf{H})\mathbf{H} \cdot \mathbf{v} \right) d\tau \\ &\quad + \int \left((\nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \epsilon\mathbf{E})) \cdot \mathbf{E} + (\nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mu\mathbf{H})) \cdot \mathbf{H} \right) d\tau \end{aligned} \quad (12.24)$$

- La première intégrale est égale à $\int c \nabla \cdot (\mathbf{E} \wedge \mathbf{H}) d\tau$, soit la puissance rayonnée exprimée en utilisant le vecteur de Poynting.
- La deuxième intégrale est la puissance perdue par effet Joule.
- La troisième intégrale correspond aux termes d'électrostatique et de magnétostatique : $(\nabla \cdot \epsilon\mathbf{E})\mathbf{E} = \rho\mathbf{E}$ est la force électrostatique, le second terme est la force magnétique (nulle).

Le dernier terme nécessite une légère mise en forme pour être plus explicite. On utilisera

les vecteurs $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$ et $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ pour plus de clarté. En intégrant par parties :

$$\begin{aligned}
 I_4 &= \int (\nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mathbf{D})) \cdot \mathbf{E} + (\nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B})) \cdot \mathbf{H} \, d\tau \\
 &= \int (\mathbf{v} \wedge \mathbf{D}) \cdot (\nabla \wedge \mathbf{E}) + (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}) \cdot (\nabla \wedge \mathbf{H}) \, d\tau \\
 &= \int (\mathbf{D} \wedge (\nabla \wedge \mathbf{E})) \cdot \mathbf{v} + (\mathbf{B} \wedge (\nabla \wedge \mathbf{H})) \cdot \mathbf{v} \, d\tau
 \end{aligned} \tag{12.25}$$

En réutilisant les équations 12.19 :

$$\begin{aligned}
 I_4 &= - \int \left(\mathbf{D} \wedge \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) \cdot \mathbf{v} - \mathbf{D} \wedge (\nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B})) \cdot \mathbf{v} \, d\tau \\
 &\quad - \int \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \wedge \mathbf{B} \right) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{B} \wedge (\nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mathbf{D})) \cdot \mathbf{v} + (\mathbf{j} \wedge \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} \, d\tau \\
 &= - \int \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \wedge \mathbf{B} \right) \cdot \mathbf{v} + \left(\mathbf{D} \wedge \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) \cdot \mathbf{v} \, d\tau \\
 &\quad - \int \mathbf{B} \wedge (\nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mathbf{D})) \cdot \mathbf{v} - \mathbf{D} \wedge (\nabla \wedge (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B})) \cdot \mathbf{v} + (\mathbf{j} \wedge \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} \, d\tau
 \end{aligned} \tag{12.26}$$

Les deux termes avec le double produit vectoriel dans la seconde intégrale peuvent se mettre sous la forme : $-\int \nabla \cdot ((\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}) \wedge (\mathbf{v} \wedge \mathbf{D})) \, d\tau$, nulle sur tout l'espace.

Toujours dans la seconde intégrale on reconnaît aisément la force de Laplace qui s'applique sur la matière traversée par un courant de conduction électrique en présence d'un champ magnétique.

Dans la première intégrale le premier terme correspondrait à la force de Laplace appliquée au courant de déplacement, force déjà présente chez Maxwell. La différence essentielle est que cette force existe même en absence de matière.

Le dernier terme, en $\mathbf{D} \wedge \dot{\mathbf{B}}$, est la contribution majeure de Hertz, qu'il avait déjà exprimé dès 1884 en travaillant sur l'induction dans des circuits mobiles. La force de Hertz est l'analogue de la force de Laplace, à savoir une action mécanique exercée par un champ électrique sur de la matière traversée par un courant magnétique.

Annexe n°6 : Quelques grands noms de la physique et de l'électricité en France à la fin du XIXe siècle

Henri BECQUEREL (1852-1908) : Henri Becquerel est issu d'une dynastie de physiciens bien connus. Son grand-père, Antoine César, a notamment travaillé sur le phénomène de piézo-électricité et observe en 1827 le comportement de corps diamagnétiques. Son père, Alexandre Edmond, est connu pour être le précurseur de la phosphorescence. Henri, comme ses aïeux, passe par l'École Polytechnique (X 1872), et intègre l'École des Ponts et Chaussées. Il succède à son père à la chaire de physique du Muséum d'histoire naturelle en 1892, puis devient professeur de physique à Polytechnique en 1895. Il est connu pour ses travaux sur la radioactivité pour lesquels il obtiendra en 1903 le prix Nobel, qu'il partage avec les époux Curie.¹²⁸

Antoine BRÉGUET (1851-1882) : Antoine Louis Bréguet, est issu d'une grande famille d'ingénieurs. Son père, Louis Clément Bréguet, s'est illustré notamment par ses travaux sur la télégraphie. Antoine est polytechnicien (X 1872), et se présente régulièrement comme « ingénieur-constructeur », ce qui laisse entendre qu'il n'a pas intégré d'école de corps de l'État après son passage à Polytechnique. Il prend la relève de son père à la tête des ateliers Bréguet. Son fils, Louis Charles Bréguet, deviendra un pionnier de l'aviation.¹²⁹

128. Dictionnaire Larousse en ligne : https://www.larousse.fr/encyclopedie/personnage/Henri_Becquerel/108127.

129. Bréguet 1878 ; Burnand 1924, p. 120.

Hypolite FONTAINE (1833-1910) :¹³⁰ François Hypolite Fontaine est né à Dijon (Côte d'Or). Ingénieur des Arts et Métiers, il devient le directeur de la société d'exploitation Gramme, avant de participer à l'Exposition de 1881 comme président du syndicat « chargé d'assurer les services de l'éclairage et de la force motrice », et fait également partie du Congrès des électriciens. Auteurs de plusieurs ouvrages sur l'électricité, notamment du « premier traité complet sur l'éclairage électrique », il occupera également la présidence de la SIE.¹³¹

Zénobe GRAMME (1826 - 1901) : Né en Belgique dans une famille modeste, il suit dans sa jeunesse les cours du soir de l'École industrielle de Liège. Il devient à partir de 1860 menuisier pour la société « l'Alliance », société de construction d'appareillages électriques. qu'il quitte en 1863 pour se perfectionner chez le constructeur Ruhmkorff . Il dépose ses premiers brevets en 1867 et met au point sa première dynamo réversible à courant continu. En 1871, Jamin présente devant l'Académie des Science le dispositif. Une polémique lie l'inventeur belge au physicien italien **Antonio Pacinotti** qui a mis au point dès 1863 un dispositif éponyme, l'anneau de Pacinotti. C'est à ce dernier que la paternité du principe utilisé sera attribuée.¹³²

Charles-Édouard GUILLAUME (1861-1938) : Suisse, Guillaume fait ses études à l'École Polytechnique de Zurich où il obtient un doctorat. Après un court passage dans l'armée, où il sert comme officier d'artillerie, il entre au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) à Sèvres en 1883, où il fait toute sa carrière : il devient directeur-adjoint en 1889 puis directeur en 1915. Dans le cadre de ses travaux sur les étalons de longueur, il étudie notamment un alliage, l'invar, ayant un coefficient de dilatation dix fois plus faible que le fer, et un autre alliage — l'elinvar — de coefficient d'élasticité quasiment nul. Guillaume obtient le prix Nobel en 1920 « en reconnaissance des services qu'il a rendus à la précision de la mesure en Physique par ses découvertes des anomalies dans les alliages d'acier au nickel ». ¹³³

130. Le prénom est bien souvent orthographié de façon incorrecte (Hippolyte). Sur le décret de nomination en tant que Chevalier de la Légion d'Honneur, il est d'ailleurs corrigé.

131. Source : Base Léonore, Dossier : LH/993/29.

132. *Les Carnets du Musée des Arts et Métiers : Zénobe Gramme*. Consulté sur https://www.arts-et-metiers.net/sites/arts-et-metiers.net/files/asset/document/carnet_gramme.pdf le 03/05/2020.

133. Voir Walter 2007, p. 170. Voir également : The Nobel Prize in Physics 1920. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2020. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1920/summary/>. Consulté le 27/06/2020.

Éleuthère MASCART (1837-1908) : Ancien élève de l'École Normale Supérieure, il obtient l'agrégation de physique en 1861 avant de devenir docteur en physique en 1864. Après plusieurs années d'enseignement à Metz puis à Paris, il obtient la chaire de physique générale et expérimentale au Collège de France en 1872. Il participe largement au Congrès des électriciens de 1881, notamment en tant que secrétaire de la commission des unités électriques, puis à la création du Laboratoire Central d'Électricité et de l'École Supérieure d'Électricité en 1894, dont il sera le premier directeur. Il rédige les *Leçons sur l'électricité et le magnétisme* avec Jules Joubert à partir de 1882.¹³⁴

Ernest MERCADIER (1836 - 1911) : Élève de l'École Polytechnique (X 1856), il dirige plusieurs services de télégraphie entre 1856 et 1870. Il est officiellement nommé Ingénieur des Postes et Télégraphes en 1871, et s'investit dans la création de l'École Supérieure de Télégraphie en 1878, où il enseigne l'électricité théorique. Répétiteur de physique à Polytechnique depuis 1874, il en devient le Directeur des études à partir de 1881. Il sera présent en cette qualité à l'exposition d'électricité, où ses recherches en radiophonie lui vaudront une médaille d'or. Il se présentera, sans succès, pour obtenir la chaire d'électricité industrielle du CNAM en 1890.¹³⁵

Théodore du MONCEL (1821-1884) : Fils d'un noble de la région normande, il fait ses études au collège de Caen, et débute par de nombreux voyages au cours desquels il publie ses dessins. À partir des années 1850 il se lance dans les travaux d'électricité. Il est nommé ingénieur-électricien des Télégraphes en 1860, et publie de nombreux articles dans les journaux scientifiques, en particulier *La Lumière Électrique* dont il sera directeur de publication.¹³⁶

Lucien POINCARÉ (1862-1920) : Lucien Poincaré fait ses études à l'École Normale Supérieure (de 1883 à 1887), il devient agrégé de physique en 1887 et docteur en sciences physiques en 1890. Il commence sa carrière d'enseignant au lycée de Marseille, puis obtient un poste en 1893 au lycée Louis-le-Grand à Paris. Il est maître de conférences à l'École Normale Supérieure de jeunes filles (Sèvres) à partir de 1894, puis chargé en 1895 du cours de physique à la Faculté des sciences de Paris. Il devient en 1900 recteur de l'académie de Chambéry, et

134. Source : Comité des Travaux Historiques et Scientifiques <https://cths.fr/an/savant.php?id=869#>

135. Dubois 2002 Consulté sur www.persee.fr/doc/inrp_0000-0000_2002_ant_17_1_7840 le 03/05/2020

136. Tissandier 1884. Notons que dans cette nécrologie, Tissandier, l'un des rivaux de du Moncel sur le plan des éditions scientifiques, se permet quelques piques (voir Bouvier 2008, p. 77).

en 1902 inspecteur général de l'Instruction publique. En 1910, il est nommé directeur de l'enseignement secondaire, puis directeur de l'enseignement supérieur et enfin vice-recteur de l'académie de Paris de 1917 à 1920. Lucien Poincaré est le frère cadet du président de la République Raymond Poincaré et le cousin de Henri Poincaré.¹³⁷

Jules VIOLLE (1841-1938) : Louis Jules Gabriel Violle naît à Langres. Reçu à l'École Polytechnique et à l'École Normale Supérieure, Violle opte pour cette dernière et l'intègre en 1861. Agrégé de physique, il débute par des postes de professeur aux lycées de Besançon (en 1864) puis Dijon (en 1865). Il revient une année à l'École Normale Supérieure pour occuper le poste d'agrégé-préparateur. Après avoir obtenu son doctorat en physique, il part en province occuper le poste de maître de conférences à Grenoble à partir de 1872, puis Lyon à partir de 1879. Il revient finalement en tant que maître de conférences à l'École Normale, et occupe la chaire de physique au Conservatoire des Arts et Métiers à partir de 1891. Il publie notamment des *Cours de physique*, même si l'édition ne couvre pas tous les domaines envisagés (seuls 2 volumes sur 4 sont publiés).

¹³⁷. Havelange, Huguet et Ledebef 1986. Voir également <https://cths.fr/an/savant.php?id=108619>. consulté le 27/06/2020.

Annexe n°7 : Les systèmes éducatifs français au XIXe siècle

Sur la période qui nous intéresse de 1870 à 1900, l'enseignement français est organisé autour de deux « ordres ». L'ordre primaire constitue l'école accessible au peuple, et s'organise autour des écoles primaires (élémentaires et supérieures). L'ordre secondaire est, de son côté, réservé à la classe sociale supérieure des notables et bourgeois, et se basent sur les collèges et les lycées.¹³⁸

L'ordre primaire

La base de l'enseignement primaire est formée des Écoles Primaires Élémentaires (EPE). La scolarité y dure en théorie 7 années, de 6 à 13 ans. Les lois Ferry de 1881 et 1882, dues au ministre de l'instruction publique Jules Ferry,¹³⁹ formalisent une scolarité commune sur l'ensemble du pays. La loi du 16 juin 1881 impose la gratuité de l'enseignement dans les écoles primaires,¹⁴⁰ et celle du 28 mars 1882 impose une « instruction publique » obligatoire de 6 à 13 ans, qui peut être faite à l'école ou par la famille. Cette dernière confirme également le Certificat d'Études Primaires, institué par Victor Duruy en 1866. Ce Certificat sanctionne la scolarité primaire, et peuvent y prétendre les enfants à partir de 11 ans.¹⁴¹

L'obtention du CEP permet la poursuite d'études au sein des Écoles Primaires Supérieures (EPS). Mises en place dès le début du XIXe siècle, leur format est défini clairement par les lois Goblet de 1886 et 1887. La scolarité se fait en trois ans (précédés d'une année préparatoire), et peut être interrompue à chaque étape. En plus des EPS, des Cours

138. Pour toute cette partie voir : Prost 1968 ; Vincent 1972 ; Savoie 2013 (20/04/20).

139. Jules Ferry (1832-1893) fut Ministre de l'instruction publique et des beaux-arts et Président du Conseil à plusieurs reprises entre 1879 et 1885.

140. Source : Institut national de recherche pédagogique 1982.

141. Loi du 28 mars 1882 art. 4 et art. 6. Source <https://www.education.gouv.fr/loi-sur-l-enseignement-primaire-obligatoire-du-28-mars-1882-10526> consulté le 20/04/2020.

Complémentaires, accessibles après l'école élémentaire d'une durée d'un an, sont créés. Les débouchés des études supérieures sont majoritairement l'industrie et le commerce, ainsi que l'École Normale Primaire de formation des instituteurs.

L'ordre secondaire

Réservé aux classes sociales supérieures comme la noblesse et bourgeoisie, l'enseignement secondaires est donné dans les collèges, gérés par les communes, et les lycées, gérés par l'État. La scolarité est payante, accessible aux garçons et aux filles mais au sein d'établissements différents. La sanction des études est le baccalauréat, créé au début du XIXe siècle (décret du 17 mars 1808), et réservé à une minorité (en 1881 environ 1% d'une classe d'âge l'obtient. La réussite à ce diplôme est en conséquence une marque de qualité pour les établissements de haut niveau. Les plus prestigieux d'entre eux peuvent en outre s'enorgueillir des classes préparatoires aux grandes écoles qu'ils entretiennent.

Depuis 1852 et la réforme Fortoul (dite « réforme de la bifurcation »), deux filières co-existent : le baccalauréat ès lettres, conservant les humanités et le baccalauréat ès sciences, qui regroupe les enseignements spécifiques pour les élèves qui souhaitent préparer les écoles de l'État et l'enseignement spécial « utilitaire ». Cette distinction sera un temps supprimée en 1890 avec un baccalauréat commun, avant d'être rétablie à partir de 1902 en créant quatre filières (« latin-grec », « latin-langues », « latin-sciences » et « langues-sciences » désignées resp. par les lettres A, B, C et D).¹⁴²

Le recrutement dans les écoles varie en conséquence. Pour les écoles militaires, au premier rang desquelles Polytechnique, le baccalauréat scientifique devient obligatoire à partir de 1852. Les classes successives préparent aux différents concours : classe de 1^{re} pour certaines écoles (comme l'École forestière), classe de terminale pour le baccalauréat ès sciences et l'École Saint-Cyr notamment, et parfois classe de mathématiques spéciales pour Polytechnique, dont le concours est jugé — à raison — plus difficile. Avec la réforme de 1890 et le retour provisoire du baccalauréat unique classique (baccalauréat de l'enseignement secondaire « classique ») ou spécial (baccalauréat de l'enseignement secondaire « spécial » ou « moderne »), les candidats à Polytechnique peuvent justifier de l'obtention de la première partie de ce baccalauréat, et faire ensuite une classe de mathématiques spéciales au lieu de la terminale.¹⁴³ L'école Centrale n'impose pas de conditions sur la détention du baccalauréat.

142. Savoie 2013, VIII 401-45, §64.

143. *JO*, 23 décembre 1893, p. 6304.

Annexe n°8 : Quelques dispositifs électriques

L'éclairage électrique

Les lampes à arc : Le premier dispositif d'éclairage électrique est mis au point en 1813 par le chimiste Humphry Davy (futur mentor de Michael Faraday). Il obtient un éclat intense en réalisant une décharge électrique entre deux crayons de bois placés dans une ampoule à vide et reliés à une pile puissante. En 1844, Léon Foucault modifie le dispositif de Davy en utilisant des électrodes de « charbon de cornue de gaz » (aussi appelé *coke*, issu de la pyrolyse de la houille) dans l'air et non plus dans le vide (profitant de la faible combustibilité du coke). L'écart entre les électrodes augmentant du fait de la combustion de celles-ci, Foucault introduit un **régulateur** afin de maintenir l'intensité de l'arc constante. L'amélioration des dispositifs permet une utilisation de plus en plus développée et, dès les années 1870, les chantiers de nuit sont régulièrement éclairés à l'électricité.¹⁴⁴

Le régulateur : Afin de maintenir une intensité lumineuse constante dans les lampes à arc, Léon Foucault en France et William Edwards Staite en Angleterre introduisent simultanément un dispositif permettant de rapprocher les charbons au fur et à mesure (voir figure 12.9). Ces derniers sont fixés à des ressorts, eux-mêmes soumis à l'action d'un électro-aimant, alimenté par le courant même de la pile qui alimente les charbons. Lorsque les charbons se consomment et que l'écart augmente, l'intensité dans le circuit diminue, la force de l'électro-aimant également. Les ressorts se détendent et rapprochent les charbons.¹⁴⁵

144. Figuiet 1862, vol. 6, p. 393-4. Toutes les descriptions sont faites en utilisant le livre contemporain de Figuiet.

145. Figuiet 1862, vol. 4, p. 218-9.

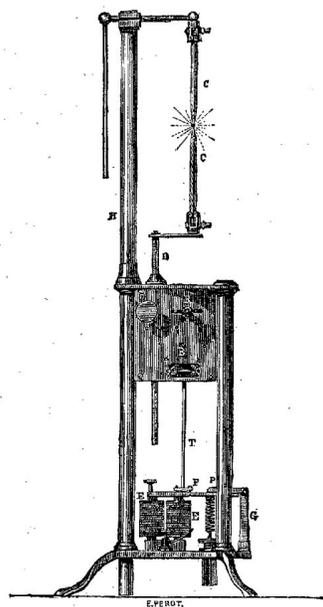


FIGURE 12.9 – Régulateur de Léon Foucault et Jules Dubosq (tiré de Figuiet 1862, vol. 4, p. 219).

La bougie Jablochkoff : La nécessité d'utiliser un régulateur est supprimée par l'invention d'un ingénieur russe, Pavel (ou Paul) Jablochkoff (1847-1894). En 1876, il crée la bougie éponyme (voir figure 12.10), qui consiste en deux baguettes de charbon parallèles et séparées par une lame de plâtre, matière fusible et isolante. Seule les extrémités des baguettes sont en regard. Lorsque celles-ci diminuent, l'arc se rapproche du plâtre et le fait fondre, de telle sorte qu'une portion du charbon est continuellement mise à découvert. Ce dispositif est placé dans un globe dépoli afin d'atténuer la luminosité, trop violente. Les bougies Jablochkoff furent notamment utilisées pour éclairer l'avenue de l'Opéra lors de l'Exposition universelle de 1878.¹⁴⁶

Les lampes à incandescence : La première tentative de lampe à incandescence est réalisée en 1859 par l'ingénieur français Charles de Changy (1817-1864), avec des expérimentations sur le platine. Matière trop facilement fusible, le platine est remplacé par le charbon, matière infusible mais qui brûle à l'air. Il devient donc nécessaire de le placer dans un ampoule sous vide (ou dans un gaz non comburant comme l'azote). Ces premières tentatives, dues par exemple à Joseph Swan (1828-1914), sont des échecs. En 1879, l'inventeur américain Thomas Edison (1847-1831) annonce avoir réussi à construire une ampoule à incandescence.

146. Figuiet 1862, vol. 6, p. 394-5.

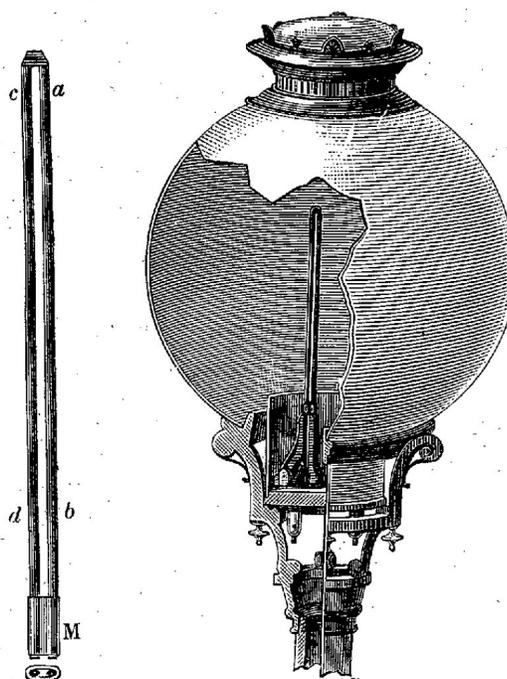


FIGURE 12.10 – Dessin du dispositif inventé par Jablochkoff. À gauche : baguettes mise en regard (le plâtre n'est pas représenté). À droite : représentation du dispositif dans son ensemble (tiré de Figuiet 1862, vol. 6, p. 395).

Si ce n'est à ce moment pas tout à fait exact (d'après Figuiet le procédé employé par Edison est alors imparfait), Edison perfectionne son dispositif et le fait admirer à l'Exposition d'électricité de 1881. L'ampoule Edison (voir figure 12.11) est une ampoule de verre sous vide contenant un filament de charbon fixé sur des supports de platine reliés aux fils. Edison obtient ce charbon par la combustion de filaments de bambou.¹⁴⁷

Les machines à induction

Les premiers moteurs électriques : La première tentative d'obtenir une action mécanique à partir de l'électro-magnétisme est, d'après Figuiet, à mettre au crédit d'un ecclésiastique de Padoue, l'abbé Salvator dal Negro, qui en 1831 réussit à utiliser le mouvement

¹⁴⁷. Figuiet 1862, vol. 6, p. 397-8. À l'Exposition de 1881, Hiram Maxim et Joseph Swan exposent également leurs propres ampoules à incandescence. La lampe Edison est, d'après les expériences réalisées, reconnue meilleure que les autres. Voir : Allard et al. 1882 et 1883.

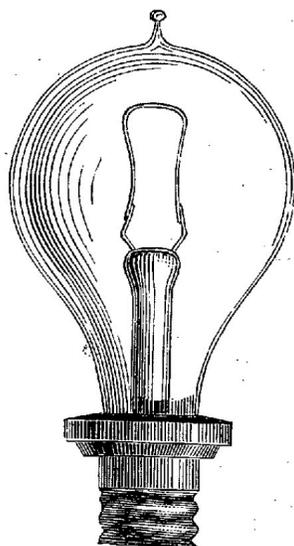


FIGURE 12.11 – Ampoule Edison (tiré de Figuiet 1862, vol. 6, p. 398).

d'une pièce de fer mue par l'électro-magnétisme. Le premier véhicule mis en mouvement par l'électricité est dû à Moritz von Jacobi (1801-1874), frère du célèbre mathématicien, qui décrit sa machine en 1834 avant de faire une tentative de motorisation d'un navire sur la Neva, qui se conclut par un échec.¹⁴⁸

La machine de l'Alliance : Parmi les principales génératrices de courant, la machine de la compagnie l'Alliance, développée par Joseph van Malderen (1821-1881) est très utilisée dans les systèmes d'éclairage, notamment à Paris, ainsi que pour les phares côtiers. Elle se compose d'un axe horizontal sur lequel se trouvent des cylindres porteurs de bobines d'induction (voir figure 12.12). Cette axe est mû par une machine à vapeur. Les bobines se déplacent alors entre des électroaimants disposés en rayon autour de l'axe. Un commutateur permet de changer le sens du courant pour obtenir un courant induit de signe constant.

La machine de Gramme et la traction ferroviaire : Au sein de la compagnie l'Alliance, l'un des ingénieurs acquiert une renommée particulière, il s'agit de l'inventeur Zénobe Gramme. Sur la figure 12.13, AA' et BB' sont les électro-aimants inducteurs, CD est la bobine d'induction. Elle est mise en rotation par l'intermédiaire de la poulie. Le courant est récupéré par le collecteur F. La machine de Gramme se décline également en version

148. Figuiet 1862, vol. 2, p. 387-8.

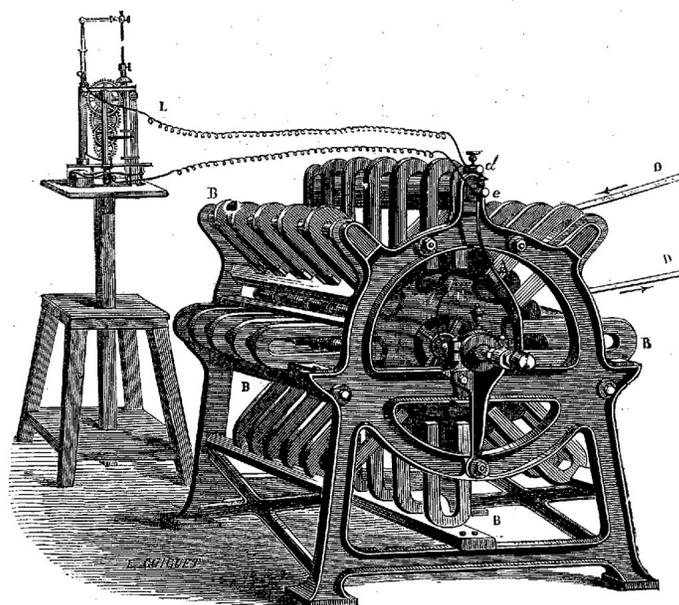


FIGURE 12.12 – Machine électromécanique de la Compagnie Alliance alimentant une lampe (tiré de Figuiet 1862, vol. 1, p. 723).

multipolaire. La machine fonctionne avec du courant continu (pour l'alimentation des électroaimants). L'assemblage de deux machines Gramme en série permet d'utiliser la première comme moteur et la seconde comme génératrice, illustrant la réversibilité de cette machine. Le couplage est réalisé pour la première fois par Hypolite Fontaine à l'Exposition de Vienne en 1873. C'est ce principe que réutilise Werner Siemens (1816-1892) pour la traction des convois ferroviaires, en utilisant une machine à vapeur fixe, une première machine de Gramme comme génératrice, qui envoie du courant dans une seconde machine installée sur la voiture, fonctionnant comme moteur et actionnant les roues. Le courant est transmis par l'intermédiaire d'un rail central métallique, et récolté sur la voiture par des lames flexibles.¹⁴⁹

149. Figuiet 1862 vol. 5, p. 432-3, p. 457-9.

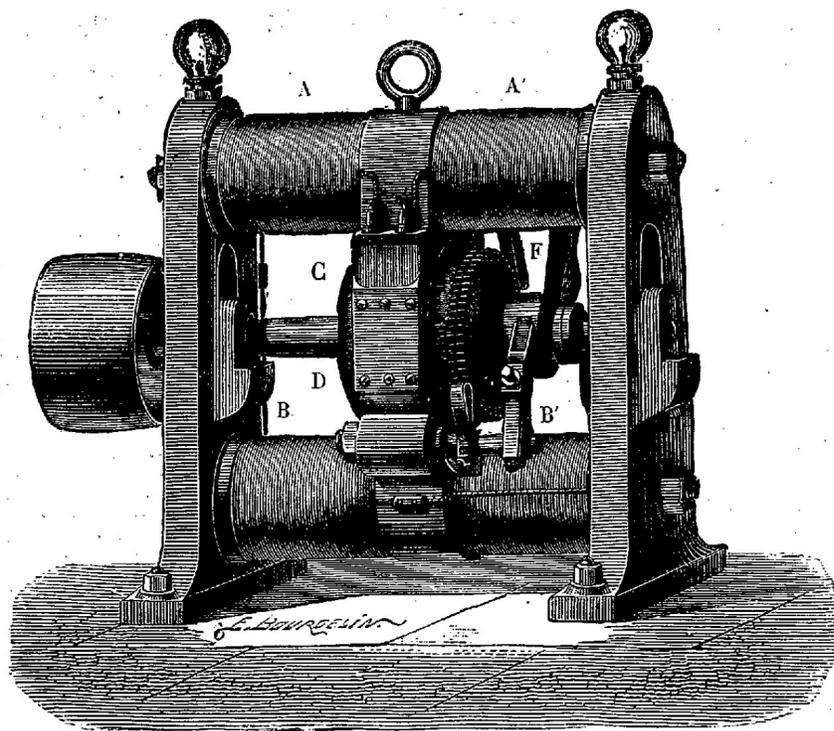


FIGURE 12.13 – Dessin de la première machine électromécanique de Gramme (tiré de Figuiet 1862, vol. 5, p. 432).

Annexe n°9 : Rapport d'un officier de l'École de l'Artillerie et du Génie sur les évaluations du cours d'électricité

Fontainebleau, le 27 novembre 1895.

Rapport du capitaine d'artillerie professeur du cours de sciences appliquées sur les résultats obtenus aux interrogations du cours d'électricité professé aux officiers-élèves de la 2^e Division

À la suite des résultats très médiocres obtenus à l'interrogation qui a suivi les leçons sur les applications de l'électricité, Monsieur le Général commandant l'école a demandé au capitaine d'artillerie professeur du cours de sciences appliquées de lui fournir un rapport lui indiquant les motifs auxquels il pensait devoir les attribuer.

Le cours sur les applications de l'électricité est professé aux officiers-élèves de la 2^e Division et comporte 8 leçons, 1 conférence pratique et 3 séances de salles consacrées à la rédaction d'un avant-projet d'éclairage électrique, conformément aux indications d'une instruction spéciale.

Sur ces 8 leçons, 6 sont consacrées à la récapitulation des lois générales de l'électricité, à l'étude et à l'usage des appareils de mesure, des machines dynamos, etc., ainsi qu'aux divers modes d'éclairage électrique employés. C'est principalement sur les matières ci-dessus énumérées qu'a été constatée la faiblesse des réponses aux interrogations. Pour ce qui concerne les matières traitées dans les deux dernières leçons, matières se rapportant à la télégraphie militaire, il n'y a rien de particulier à signaler, les réponses ayant été en général satisfaisantes.

Des cours autographiés ont été remis en temps utile aux officiers-élèves pour leur faciliter l'étude de ces leçons. En outre, et eu égard aux difficultés déjà éprouvées par les promotions précédentes pour suivre ce cours, un appendice spécial elucidant les points principaux de la théorie admis au cours leur a été distribué cette année. Cet appendice, forcément très résumé

pour ne pas empiéter sur les cours théoriques précédemment suivis par les officiers-élèves à l'école polytechnique, a été compris et retenu par le plus petit nombre.

Le nombre très restreint des leçons consacrées à l'école aux applications électriques ne permet, en effet, qu'un rappel sommaire des principes, théorèmes fondamentaux et déductions mathématiques de l'électricité théorique. Rendu nécessaire pour la clarté de l'enseignement, ce rappel ne peut être étendu au-delà d'une limite très resserrée sans nuire à l'étude des applications pratiques en vue desquelles le programme de ce cours de l'école a été établi.

Or, en l'état actuel de la science électrique, le lien entre un grand nombre de données théoriques et les applications industrielles est trop intime pour qu'on puisse aborder avec fruit celles-ci si l'on n'est déjà en commerce familier sinon avec l'exposé des démonstrations elles-mêmes, du moins avec les principaux résultats de la théorie. Il est loin d'en être ainsi pour les officiers-élèves.

Les professeurs du cours de sciences appliquées ont constaté chez un grand nombre d'officiers-élèves, et cela depuis plusieurs années déjà, une ignorance presque complète de l'établissement et des usages des unités électriques indispensables pourtant à connaître et à manier aisément dans les applications. Les énoncés des théorèmes fondamentaux de l'électricité statique et dynamique sont souvent ou oubliés ou incompris de la plupart.

Chez ceux qui, plus heureux, paraissent avoir retenu ou compris plus complètement l'enseignement théorique, on remarque clairement qu'ils ne savent distinguer soit l'importance relative des principes, soit leur utilité plus ou moins immédiate en vue des applications pratiques.

En résumé, incertains au milieu d'un grand nombre de données théoriques, inexpérimentés sur le choix de celles qui jouent un rôle capital dans la pratique, les officiers-élèves suivent avec peine l'enseignement de l'école et tirent peu de fruit des leçons de choses faites par les professeurs lors des visites dans les grands établissements industriels.

Le capitaine d'artillerie professeur du cours de sciences appliquées

Annexe n°10 : Article d'Édouard Hospitalier sur les discours de William Preece au colloque de la *British Association*

QU'EST-CE QUE L'ÉLECTRICITÉ ?

Telle est la question que se pose le savant président de la section G,¹⁵⁰ de la *British Association* M. W.-H. Preece, après avoir passé en revue les progrès immenses réalisées pendant ces dernières années par les applications industrielles de l'électricité.

Nous croyons utile de traduire *in extenso* toute la partie du discours de M. Preece relative à cette question importante, car elle montre bien l'état actuel des opinions modernes sur ce problème presque insoluble.

« Il semble incroyable qu'après avoir utilisé cette grande puissance de la nature d'une manière si générale, nous soyons encore dans une sorte de brouillard mental sur la réponse à donner à cette simple question : QU'EST-CE QUE L'ÉLECTRICITÉ ?

L'ingénieur et le physicien sont en complet désaccord sur ce point. L'ingénieur regarde l'électricité ainsi que la chaleur, la lumière et le son, comme une forme définie d'énergie, quelque chose qu'il peut produire et détruire, quelque chose qu'il peut modifier à sa guise, utiliser, mesurer et appliquer. Les physiciens — ou tout au moins certains physiciens, car il est difficile de trouver deux physiciens qui soient absolument d'accord entre eux — regardent l'électricité comme une forme particulière de la matière remplissant tout l'espace aussi bien que les substances, en même temps que l'éther, et qu'elle pénètre comme une gelée ou une

¹⁵⁰. La Section G est la section de Mécanique. Elle diffère de la Section A, Sciences physiques et mathématiques.

éponge.¹⁵¹ D'après cette théorie, les conducteurs sont des trous ou des tuyaux ménagés dans cette gelée, et les générateurs électriques sont des pompes transportant cette matière hypothétique d'un point à un autre. D'autres physiciens, adoptant les idées d'Edlund,¹⁵² regardent l'éther et l'électricité comme identiques, et d'autres, disciples d'Helmholtz, la considèrent comme un constituant intégral de la nature, chaque molécule de matière ayant sa propre charge, qui détermine son attraction et sa répulsion.

Tous les essais faits pour rajeunir la théorie de Franklin ou la théorie de la matière électrique renferment tant d'hypothèses et de contradictions qu'elles sont impuissantes à tirer l'électricité du mystère qui l'enveloppe. Il est déjà très difficile de concevoir l'existence de l'éther lui-même comme un milieu infiniment léger, très élastique, remplissant tout l'espace et servant seulement de véhicule aux mouvements ondulatoires qui nous donnent la lumière et la chaleur rayonnante. La théorie matérielle de l'électricité nous demande d'adjoindre à ce milieu un autre milieu incompréhensible incrusté ou emmêlé dans cet éther, ne servant pas de milieu au mouvement et se mouvant lui-même. L'homme pratique, dont l'œil et l'esprit sont entraînés par les sévères réalités de l'expérience journalière, sur une échelle immense comparée au petit monde du laboratoire, se révolte à la pensée d'hypothèses aussi sauvages (*wild*), de conceptions aussi inutiles et inconcevables travestissant la magnifique simplicité de la nature

Pour l'homme pratique, la conception claire de l'électricité est qu'elle a une existence objective distincte, qu'il peut la fabriquer et la vendre, et qu'un membre quelconque de la société, ne fût-il pas physicien, peut l'acheter et s'en servir.

Le physicien affirme dogmatiquement : L'électricité peut être une forme de la matière, ce n'est pas une forme de l'énergie.

L'ingénieur répond : L'électricité est une forme de l'énergie, ce n'est pas une forme de la matière, car elle obéit aux deux grands principes qui guident le développement de la génération présente : la théorie mécanique de la chaleur et la conservation de l'énergie.

Ces différences de vue doivent avoir une cause, et il est clair que le physicien et l'ingénieur n'appliquent pas le mot *électricité* à la même chose. L'électricité de l'ingénieur est une forme réelle de l'énergie, l'électricité du physicien est une simple irréalité vague et subjective, un

151. Preece fait ici référence à des théories de l'éther, le *jelly-ether* proposé par W. Thomson, et le *vortex-songe* proposé par F. FitzGerald. Voir partie 1.

152. Preece fait ici référence aux idées du physicien suédois Erik Edlund, qui identifie éther et électricité. Sur ce point voir Lundqvist 1998, p. 15 (notre traduction) : « Edlund est allé jusqu'à identifier le fluide électrique et l'éther, attribuant à un corps chargé positivement un excès d'éther et à un corps chargé négativement une déficience d'éther. Il considérait ce milieu comme un liquide, soumis au principe d'Archimède, et de cette façon réussit à imputer tous les effets électrostatiques à la répulsion mutuelle des particules d'éther ».

simple facteur de l'énergie et non pas l'énergie elle-même. Ce facteur, comme la force, la pesanteur, la vie, reste, pour le présent du moins, absolument inconnu. On ignore ce qu'est la force, la matière ou la pesanteur. Le métaphysicien a même des doutes en ce qui concerne l'espace et le temps. La connaissance de ces choses commence avec une définition. L'esprit humain est si étroit, ou le langage si pauvre, que les auteurs cessent même d'être d'accord sur une définition. La définition de l'énergie est la capacité de produire du travail. L'homme pratique se contente de partir de là et d'affirmer que l'électricité est quelque chose qui a la capacité de produire du travail, et que c'est une forme de l'énergie. Le physicien peut spéculer à son aise sur les facteurs de l'énergie, il n'enlèvera pas à l'ingénieur son mot *électricité*, et il est profondément regrettable que le différend ne puisse être tranché en changeant le terme.

Les physiciens laisseraient le mot *électricité* pour désigner cette forme spéciale de l'énergie, qui est une réalité objective et que le commun des mortels conçoit parfaitement, tandis que les ingénieurs seraient parfaitement satisfaits si les physiciens spéculatifs et les mathématiciens enthousiastes employaient un autre mot pour désigner leur irréalité subjective, leur matière électrique imaginaire. S'il faut créer une matière imaginaire pour satisfaire aux hypothèses et aux abstractions mathématiques, appelons-la *coulombisme* ou *électron*,¹⁵³ mais ne nous emparons pas du mot générique et compréhensif *électricité*. L'ingénieur trouve que les mouvements de la matière et de l'éther suffisent pour satisfaire à toutes les exigences et interpréter tous les phénomènes auxquels on donne le nom d'*électriques*.

Il semble paradoxal d'affirmer que deux irréalités puissent produire une réalité, et que deux idées subjectives puissent se fondre en une idée objective, mais il faut se souvenir que tous les phénomènes électriques empruntent en dehors leur objectivité et leur réalité, et que le mouvement qui rend un phénomène électrique évident résulte d'une certaine forme de l'énergie. La doctrine de la conservation de l'énergie affirme que l'énergie ne se détruit pas et ne fait que se transformer. La notion du travail — quelque chose de produit pour vaincre une résistance —, et celle de la puissance — le taux auquel ce changement est effectué —, sont les clefs qui permettent d'arriver à la conception du caractère des grandes sources de puissances de la nature. Leur application aux usages de l'homme est la profession directe de ceux qui se réunissent dans la section G de l'Association britannique pour discuter les applications pratiques des plus importants principes de philosophie naturelle qui ont, dans une grande mesure, réalisé les prédictions de Bacon, et changé l'aspect et l'état des affaires du monde entier... ».

Nous ne saurions partager l'opinion de M. Preece en ce qui concerne les définitions qu'il

153. Précisons que ce discours, tenu en 1888, est bien antérieur à la théorie de Lorentz (ou aux autres théories postulant l'existence de singularités dans l'éther) et aux expériences de J.J. Thomson.

croît devoir adopter pour l'électricité et l'énergie : le désaccord entre les physiciens et les ingénieurs est beaucoup moins grand qu'il n'en a l'air, et peut disparaître sans qu'il y ait nécessité de créer de nouveaux termes, tels que *coulombisme* et *électron*.

La confusion que signale M. Preece provient de ce que l'on cherche à donner la définition d'un mot qui n'est, en réalité, qu'une simple étiquette destinée à indiquer le caractère commun d'un ensemble de phénomènes désigné eux-mêmes sous le nom de *phénomènes électriques*. La cause commune de ces phénomènes était attribuée autrefois à un fluide spécial, l'*électricité*, mais il est établi aujourd'hui que ce fluide n'a pas d'existence réelle ou subjective.

Il est donc parfaitement oiseux, dans l'état actuel de nos connaissances, de chercher à définir quelque chose qui ne comporte pas de définition, parce que ce quelque chose n'a pas d'existence. On peut définir l'*énergie électrique*, la *force électromotrice*, l'*intensité d'un courant électrique*, la *puissance électrique* et la *quantité d'électricité* en appliquant les relations fondamentales qui relient ces différentes quantités physiques entre elles : l'électricité n'ayant pas d'existence, ne comporte aucune définition. Telle est la seule réponse que l'on puisse faire à la question : Qu'est-ce que l'électricité ?

E.H.

Annexe n°11 : Lettre d'étudiants adressée à Rudolf Clausius sur la nature de l'électricité

Tirée de *La Lumière Électrique*, vol. XVI (1885), pp. 419-23.

bons sont suspendus à une plaque d'ébonite, le vase rectangulaire contenant le liquide est placé au-dessous, de sorte que les éléments ne plongent pas. On élève ce vase au moyen d'une sorte de levier faisant pédale, ce qui est très pratique. Cette pile est destinée à être employée avec les galvanocautères.

Le plus souvent, dans les appareils exposés, la pile à courant continu était combinée dans une même boîte ou un même meuble.

Une de ces combinaisons, construite par la

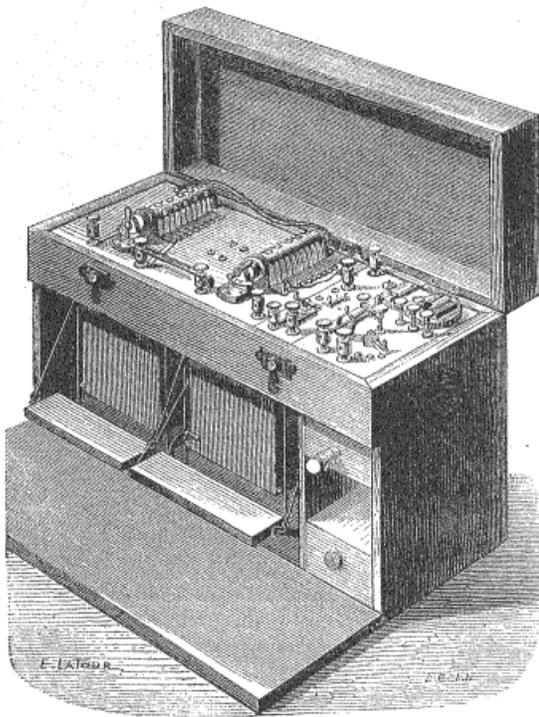


FIG. 8

Western Electric Manufacturing Co est représentée par la figure 7.

Les éléments sont disposés dans le bas de l'appareil et une manette venant toucher des contacts circulaires permet d'en prendre un nombre voulu. La bobine est, comme dans les autres appareils des mêmes constructeurs, en évidence sur la partie antérieure de la boîte. Un galvanomètre et un rhéostat complètent l'appareil.

L'appareil mixte de M. Flemming (fig. 6) reproduit deux piles à courant continu dans le genre de celle que nous avons décrite plus haut, mais on lève les vases contenant le liquide à l'aide de tiges, ce qui est moins bon que la pédale. L'appareil

d'induction comprend un élément de pile spécial à fermeture hermétique, et une bobine dissimulée dans un compartiment de la boîte.

Une disposition analogue à cette dernière se retrouve dans le grand modèle de M. Flemming (fig. 8). Pour les piles à courant continu, le constructeur a de nouveau adopté la pédale et muni les deux piles de commutateurs Planté, permettant de les grouper, soit en tension, soit en quantité.

A côté de ces principaux appareils, nous pourrions citer encore certains dispositifs tels que baignoires ou bains de siège électriques, systèmes pour combiner l'action de la vapeur avec celle de l'électricité, etc. ; ces dispositions sont peu importantes ; il nous suffira d'avoir donné, pour l'édification de nos constructeurs, les principaux types d'appareils électro-médicaux représentés à Philadelphie.

AUG. GUEROUT.

LETTRE A MONSIEUR CLAUDIUS

A Monsieur le professeur Clausius, doyen de la faculté de Bonn.

Monsieur et honoré maître,

Quelques étudiants électriciens français, après avoir lu le discours que la *Lumière Electrique* a publié le 9 mai dernier, ont pensé que vous accueillerez avec indulgence leurs humbles doutes sur l'existence réelle de l'éther, et s'estimeront heureux si vous les honorez d'un mot de réponse.

C'est une bonne fortune pour nous, quand un professeur justement vénéré, ose aborder un sujet aussi délicat que celui de l'essence même des grands agents de la nature.

Vous nous expliquez excellemment comment Huygens, un Hollandais de génie, aperçut le premier les analogies admises aujourd'hui entre les phénomènes sonores et les phénomènes lumineux, grâce à l'hypothèse d'un fluide impondérable élastique qu'on appela l'éther, et qui pénétrerait indistinctement tous les corps solides, liquides ou gazeux, et serait également présent dans ce qu'on est convenu d'appeler le vide. Les atomes matériels paraissaient, dites-vous, à Huygens trop peu subtiles, pour transmettre directement au nerf optique ce mouvement vibratoire si délicat, se transformant en une impression que nous désignons par le terme *voir*.

N'y a-t-il pas là, cher maître, une accusation de grossièreté un peu téméraire à l'égard des atomes matériels ?

Nul jusqu'à présent n'a osé mesurer ni un atome ni une distance atomique, et c'est surtout à la loi des équivalents qu'on doit la foi universelle aujourd'hui, en la réalité des atomes ayant un poids spécial pour chaque corps simple, et permettant de calculer d'avance le rapport du poids d'un certain nombre d'atomes, au poids d'un nombre correspondant de molécules, dont chacune est réputée composée d'une façon simple, par les atomes élémentaires.

Remplacez la théorie atomique par l'hypothèse de la divisibilité indéfinie de la matière, et la chimie tout entière s'effondre sous des montagnes d'invéraisemblances.

Nous partageons certainement avec vous, cher maître, la foi atomique, mais nous n'admettons pas l'accusation de grossièreté et de manque de subtilité portée par Huygens contre la matière pondérable; nous la croyons capable de se prêter d'elle-même à la propagation des vibrations lumineuses, caloriques ou électriques, aussi facilement et mieux même, quand il s'agit de certains corps, qu'elle ne se prête à la propagation sonore.

L'air dilaté, au point d'avoir pour force élastique un vingt millionième d'atmosphère, ce que le professeur Crookes appelait l'état radiant, ce que d'autres appellent l'état ultra-gazeux, ce que d'autres encore appellent le vide, n'étonne-t-il pas tous les jours les physiciens par sa conductibilité électrique comparable à celle des meilleurs métaux?

Avouons que si après Huygens, Newton a pu ramener le monde savant à la théorie de l'émission, c'est que la croyance newtonienne en une certaine matière dite lumineuse, assez subtile pour traverser indifféremment le vide, l'air, les liquides purs, certains cristaux, toutes les matières dites transparentes et particulièrement le verre, n'était guère plus déraisonnable que la croyance à l'éther de Huygens, c'est-à-dire à une matière également subtile, au point d'avoir élu d'avance et indifféremment domicile, non seulement dans le vide où il ne semble pas trop déplacé, mais encore dans tout ce que l'univers contient de solides, de liquides, de gaz ou d'ultra-gaz.

Nous n'en sommes pas moins heureux de voir le doyen d'une des plus célèbres universités, secouer par un brillant discours, l'indifférence des prétendants à la science, beaucoup plus préoccupés, quoi qu'ils en disent, de leurs intérêts matériels que de la recherche des grands mystères de la matière.

Après avoir osé troubler votre recueillement, nous vous devons une confession aussi complète que possible de nos idées en physique, et nous allons humblement essayer de la faire, espérant qu'avant de nous condamner, vous daignerez quel-

ques instants, regarder la nature avec notre lorgnette.

Le chant, la musique et les modulations les plus délicates de la voix, se transmettent à des distances de plusieurs kilomètres grâce à la propagation le long d'une grosse ficelle, de séries de vibrations dont la variété intensive et le nombre par seconde, calculable aujourd'hui, avait donné à nos arrière-grands-pères l'idée de qualifier le son de fluide-impalpable. On avait certainement songé jadis à cette hypothèse dont on retrouve des traces dans les admirables leçons de physique de l'abbé Nollet. Pour le son, c'est donc bien fini, on admet sans contester aujourd'hui l'action unique des vibrations matérielles, elles sont du reste dans certains cas, sensibles au toucher et à la vue.

Pour la chaleur que constate-t-on en étudiant la physique? D'abord l'accroissement de volume d'un corps à mesure qu'on élève sa température; n'est-il pas vraisemblable d'admettre, qu'en renforçant l'état vibratoire d'un corps dont les atomes s'éloigneraient et se rapprocheraient sans cesse, on doive augmenter la distance moyenne atomique et par conséquent le volume du corps. En général si la température augmente indéfiniment, le corps change d'état, de solide il devient liquide, de liquide il devient gazeux, souvent il se décompose, la distance entre les atomes hétérogènes devenant trop grande pour que le groupement qui constitue la molécule soit conservé.

Le froid, c'est-à-dire l'absorption par les corps environnants, de l'énergie vibratoire moléculaire du corps envisagé, produit les phénomènes inverses.

L'égalité entre les calories disparues et le travail produit est ce qu'on appelle aujourd'hui équivalence mécanique du travail et de la chaleur. Les calories représentent donc bien la somme des énergies vibratoires de chaque atome.

Les doutes à cet égard semblent maintenant complètement disparus des cours de physique. Quant à l'électricité dite statique, il est bien évident que c'est à l'enthousiasme produit par la découverte des acides et des bases, dont la combinaison donnait des sels plus ou moins neutres, qu'est due la supposition des trois fluides de nos grands papes; le fluide vitré, le fluide résineux leur semblaient en se combinant produire le fluide neutre dont le monde était soi-disant rempli. Le changement de nom du fluide vitré en fluide positif et du fluide résineux en fluide négatif n'a pas sauvé ces diverses entités, d'une déchéance qui sera bientôt l'oubli.

Les phénomènes désignés sous le nom de courants, auxquels Galvani et Volta ont attaché leur nom d'une façon impérissable, furent d'abord attribués à un fluide en mouvement; or, du moment qu'on admet l'existence d'un fluide quelconque,

fût-il l'éther de Huygens, rien n'empêche plus de lui supposer des propriétés plus invraisemblables les unes que les autres.

Certains professeurs enseignent résolument qu'un courant est une circulation à travers un tube plein, d'une certaine quantité d'électricité, et on se figure volontiers que ça n'engage à rien d'affirmer devant la jeunesse, de pareilles invraisemblances. Il faut bien, dit-on, matérialiser le raisonnement. Nous pensons, nous, que cela est très regrettable d'entendre dire : « *Quelle que soit la nature de l'électricité, j'en prends une certaine quantité, que j'appelle m,* » attendu que c'est affirmer que l'électricité est, en tous cas, une matière quelconque, et une fois la craie en main, on a bientôt couvert le tableau de formules qui ne satisfont généralement que celui qui les a écrites. Nous avons pensé plus admissible de supposer que le soi-disant courant électrique n'était qu'un mouvement vibratoire du fil métallique qu'on appelle le conducteur.

Nous pensons pourtant que ce mouvement vibratoire n'est pas isochrone comme celui qui se produit dans une tige dont un des bouts est fortement chauffé (1), mais plutôt un mouvement boiteux, c'est-à-dire que des deux mouvements opposés imperceptibles constituant la vibration, l'un est beaucoup plus rapide que l'autre; la vibration dite électrique semble différer en outre de la vibration calorique en ce qu'elle exige la fermeture du circuit vibrant ou la fixation de ses deux extrémités à une masse commune, la terre, comme une corde de piano exige pour vibrer qu'elle soit tendue entre deux points massifs.

La figure 1 représente la forme très agrandie de la courbe que produirait, en prenant le temps comme abscisse et l'amplitude comme ordonnée, la projection d'un point d'un conducteur vertical réputé traversé par un courant ayant le sens de la flèche.

L'inégalité d'usure des charbons d'un arc voltaïque s'explique naturellement dans le cas de la figure 1, la quantité de poussière charbonneuse

projetée par chacun des deux charbons n'étant pas la même.

La figure 2 représente la vibration électrique dite courant alternatif, l'égalité de dépense des poussières charbonneuses dont la vibration constitue le phénomène lumineux, s'explique alors très facilement par l'examen de la courbe.

Comme vous le dites excellemment, c'est Ampère qui, en démontrant les lois d'attraction et de répulsion des soi-disants courants, a fait disparaître pour toujours les fluides magnétiques et diama-

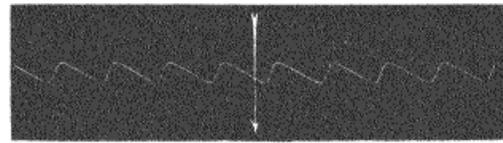


FIG. 1

gnétiques, et l'on est stupéfié quand on se rappelle que huit jours lui ont suffi pour concevoir et réaliser ses immortelles expériences.

Un fait inexplicable pour nous et sur lequel nous appelons l'attention et l'activité savante de nos collègues du monde entier, c'est la parité constante des vibrations et des attractions ou répulsions; il semble qu'il ne saurait y avoir attraction sans vibration et réciproquement. Les expériences du docteur Guyot (Paris, 1835), qui attirait les pendules de bureau avec un diapason en vibration, celles du professeur Dworak, de Prague, et surtout celles du professeur Bjerknæs, de Christiania, décrites dans *La Lumière Electrique* en 1881, sont des démonstrations irréfutables de l'équivalence du pouvoir attractif des corps et de leur état vibratoire, mais le *pourquoi* en est encore à trouver. Le

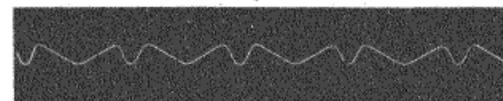


FIG. 2

jour prochain peut-être, où nous connaissons le poids d'un atome et le nombre des vibrations par seconde, correspondant à ce qu'aujourd'hui on nomme une tension, les mesures électriques prendront un caractère de précision absolument mécanique.

On montrera aux élèves le joli appareil à billes d'ivoire employé déjà à démontrer l'inertie de la matière, on fera voir la bille de droite, par exemple, provoquant par sa chute le relèvement de la bille de gauche et réciproquement, et on compa-

(1) Si au lieu d'une barre on en prend deux parallèles, qu'on ait soudé ou rivé ensemble les bouts chauffés, il suffit de réunir les bouts froids par un conducteur pour constater dans ce conducteur tous les phénomènes électriques attribués à un courant de fluide.

La seule explication vraisemblable de ce phénomène électrique, selon nous, est que le soi-disant courant n'est autre chose qu'un mouvement vibratoire boiteux, résultant des deux mouvements vibratoires caloriques antagonistes, produits par l'échauffement progressif particulier à chacune des barres hétérogènes; le nombre des vibrations électriques doit être quelque chose comme le plus petit commun multiple des nombres de vibrations des deux barres.

C'est à une combinaison arithmétique semblable que nous attribuons la fusibilité à basse température de certains alliages (métal d'Arcet).

rera la série des billes, à une file d'atomes d'un conducteur électrique, on étudiera au point de vue mécanique l'énergie maxima, dont chaque bille est détentrice, à un moment donné, on montrera que cette énergie a pour mesure la fraction de kilogrammètre représentée par la hauteur verticale à laquelle a été élevée la première bille, multipliée par le poids de cette bille, cette énergie représentée, soit par $P h$, soit par $\frac{P v^2}{2g}$ ou $\frac{m v^2}{2}$, passe par choc, de la première à la seconde bille, de la seconde à la troisième, et ainsi de suite, c'est un transport d'énergie qui se retrouve presque entièrement dans la fraction de kilogrammètre correspondant à la hauteur à laquelle s'élève la dernière bille. Or, si au lieu d'employer comme source d'énergie, la chute de la première bille, vous employez un petit marteau d'ivoire du même poids et ayant au moment du choc la même vitesse et que vous supposiez votre

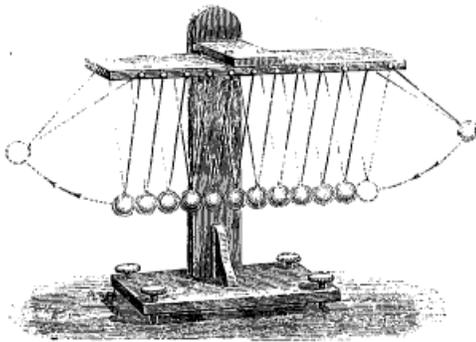


FIG. 3

marteau vibrant très rapidement, vous aurez, dans un temps donné, transporté à l'extrémité de votre file de billes, l'énergie de votre marteau $\frac{m v^2}{2}$, multipliée par le nombre N de coups de marteau. Il en serait de même pour la série d'atomes constituant un conducteur, seulement comme un conducteur peut être assimilé à un faisceau de lignes d'atomes, il faudra pour avoir la valeur de l'énergie transportée, prendre le poids de la somme des atomes contenus dans une tranche normale n'ayant que l'épaisseur d'un atome, si p est le poids d'un atome, $\sum p$ sera le poids de la tranche, si v est la vitesse maxima du mouvement vibratoire atomique considéré, $\sum \frac{p v^2}{2g}$ sera l'énergie d'une tranche, et la somme de l'énergie transportée électriquement sera $\sum \frac{p v^2}{2g} \times N$, le nombre des vibrations.

Eh bien! nous avons déjà baptisé *ampère* $\sum \frac{p v^2}{2g}$ et *volt* le nombre N . Pour avoir le *watt*, c'est-à-

dire le travail réel transporté électriquement, nous n'aurons, nous aussi, qu'à multiplier les ampères par les volts, seulement comme les humbles de la science, les ingénieurs, sont plus familiarisés avec ces kilogrammètres qu'avec les watts, nos watts seront dix fois plus grands que les watts de la commission des mesures, et pour ne pas courber le front sous le reproche, qu'on ne manquerait pas de nous faire, d'avoir des résultats variables avec la latitude, nous emploierons comme coefficient de précision $\frac{10}{g}$, g étant l'accélération de la pesanteur dans le lieu considéré, chiffre connu d'avance pour tous les points du globe.

Nous avons expliqué tout à l'heure en note, comment deux vibrations caloriques distinctes pouvaient produire une vibration boiteuse, c'est-à-dire électrique, réciproquement l'énergie sous forme électrique, peut devenir calorique au point de rougir et même de fondre le conducteur lui-même, lorsque le nombre d'ampères est trop considérable pour le diamètre du conducteur. Supposons en effet deux machines Gramme, une génératrice et une réceptrice, servant à transporter un cheval-vapeur, le lien matériel entre les deux machines est, non pas une courroie (!), mais un circuit vibrant formé par un fil de cuivre d'un millimètre carré de section d'aspect immobile, il faut d'après ce que nous venons de dire, qu'une tranche atomique d'un millimètre carré de surface et d'un atome d'épaisseur porte en elle par son mouvement vibratoire une énergie de 75 kilogrammètres divisés par le nombre N des vibrations par seconde (notre volt à nous), or si ce quotient était trop grand pour la section du fil, l'amplitude du mouvement vibratoire deviendrait comparable à celle des mouvements vibratoires caloriques, donc le fil s'échaufferait, c'est-à-dire que ses atomes s'écarteraient au point d'acquiescer la mobilité relative produite par la fusion.

Aussi lorsqu'on cherche à transporter électriquement une grande énergie à distance, à l'aide d'un conducteur de faible diamètre, la difficulté consiste-t-elle à exécuter des machines produisant par induction et grâce à certaines méthodes d'enroulement, un mouvement vibratoire ultra rapide d'un nombre considérable de volts, de façon à ce que les ampères c'est-à-dire la puissance vive d'une tranche moléculaire n'atteigne pas l'importance qui comme nous l'expliquions plus haut, produirait une amplitude vibratoire exagérée c'est-à-dire la fusion du conducteur. S'il suffit de quelques ampères pour désagréger la matière, le

(!) Quand deux poulies reliées par une courroie servent à transporter un cheval-vapeur la tension de la courroie en kilos mesurée au dynamomètre, et multipliée par le chemin parcouru en une seconde par un point quelconque de la courroie, donne exactement 75 kilogrammètres.

nombre de vibrations par seconde dont la matière est susceptible, c'est-à-dire le volt, n'a pas de limite connue. On sait déjà que vers 50000 par seconde les phénomènes acoustiques disparaissent, C'est évidemment bien au delà de ce nombre qu'on comptera un jour les vibrations caloriques, électriques ou lumineuses.

Lorsque le mouvement vibratoire électrique est produit par une pile, et nous prendrons comme exemple celle de Volta, c'est le nombre d'atomes de zinc dissous par seconde sur un même point de l'électrode qui donne la cadence du mouvement; c'est pourquoi les dimensions de la pile ne modifient en rien le nombre des volts. Lorsque, au contraire, vous couplez en tension des piles de Volta, le nombre des volts est sensiblement proportionnel au nombre des éléments, et il devait en être ainsi, puisque les vibrations peuvent sans difficulté s'ajouter les unes aux autres; les ampères sont, par contre, proportionnels aux surfaces attaquées; réciproquement, les dépôts galvaniques sont proportionnels aux ampères. Lorsque l'électricité est produite par une machine Gramme, on constate que le nombre des volts, est sensiblement proportionnel au nombre de tours par seconde de l'anneau et par le même raisonnement que nous venons d'employer pour les piles, cela était évident *a priori*, seulement, ici, l'induction joue un rôle prépondérant; or, qu'est-ce que l'induction, sinon la réversibilité du mouvement attractif ou répulsif qui se produit sur deux fils plus ou moins parallèles dont le mouvement vibratoire boite dans le même sens ou en sens opposé.

Le mouvement vibratoire de l'inducteur produit une attraction qui, dans l'induit, devient mouvement vibratoire, et si l'attraction est involontaire, le mouvement vibratoire induit est réciproque, il boite en sens opposé.

Si vous doublez, par la vitesse de rotation de l'anneau, le nombre de fois qu'une spire induite s'approche d'une spire inductrice, vous doublerez évidemment le nombre de vibrations par seconde. Poggendorff, dans sa bobine plus connue sous le nom de bobine Ruhmkorff, est arrivé à multiplier le nombre des vibrations de son fil primaire en l'enveloppant de spires très nombreuses d'un fil très fin; les vibrations produites dans plusieurs spires successives par une seule spire inductrice s'ajoutent naturellement, et il est arrivé ainsi à des phénomènes électriques de haute tension comparables à ceux des machines statiques, démontrant par là l'identité des soi disant fluides statiques et dynamiques, les premiers étant des vibrations superficielles que le frottement suffit souvent à produire, les seconds des vibrations profondes longitudinales des conducteurs dont les extrémités sont reliées solidement entre elles ou fixées à une même masse, c'est-à-dire *mises à la terre*.

Nous considérons, bien entendu, les phénomènes lumineux comme des phénomènes vibratoires dont la tension, c'est-à-dire le volt ou le nombre de vibrations par seconde, est extraordinairement grand, et dont l'intensité, c'est-à-dire l'ampère ou la puissance vive d'une tranche atomique du milieu transmetteur, est infiniment petite, tellement que le produit de ces deux quantités reste une fraction de kilogrammètre infinitésimale, suffisante cependant pour causer un choc sur le nerf optique ou produire des échauffements ou des décompositions chimiques dont est née la photographie.

Si délicat que soit le nerf optique, il nous a paru indispensable d'admettre que le choc nécessaire pour provoquer la sensation *voir*, fût comme le nerf lui-même d'essence matérielle et non éthérée.

Les artistes peintres, quand ils parlent de la gamme des nuances, de l'accord ou de la cacophonie criarde produite par la juxtaposition de certaines couleurs, nous semblent avoir eu, comme Huygens, l'intuition du mouvement vibratoire lumineux, et nous ne différons de lui que par le choix des vibrateurs.

Vous voyez, cher Maître, que notre foi en la matière est assez raisonnée et assez profonde pour mériter un peu d'indulgence de la part de nos savants doyens, et nous comptons absolument sur la vôtre.

Pour le groupe d'étudiants électriciens qui ont eu l'honneur de vous être présentés en 1881, et dont le cri de ralliement est : A BAS L'ÉTHÉRÉ!

L'un d'eux : JULES BOURDIN.

LA

LOCOMOTION ÉLECTRIQUE

DES VOITURES DE CHEMINS DE FER

PAR LES ACCUMULATEURS P. NÉZERAUX

Dans les essais de traction électrique qui se sont faits en juin 1883 de la place du Trône à la place de l'Étoile, au moyen des accumulateurs Faure, le relevé des galvanomètres a fait constater que le travail électrique dépensé pour une charge trainée de 10 tonnes a été en moyenne de 10 chevaux-heure pour ce trajet de 11 kilomètres qui s'est effectué en une heure. C'est en se basant sur cette donnée expérimentale de un cheval électrique par tonne et par heure et une capacité de 30 chevaux-heure par tonne d'accumulateurs que furent établis les calculs suivants :

1° Qu'un truck-locomoteur de 8 tonnes portant tout le mécanisme de traction et 3 tonnes d'accu-

Annexe n°12 : Article d'Alexandre Stoletow sur les liens entre éther et électricité

Tiré de *La Lumière Électrique*, vol. XXXV (1890), pp. 517-20 ; 556-6.

tion à la marine. De laborieuses recherches sont chaque jour poursuivies dans ce but par M. le capitaine Garcia, et peut-être entendrons-nous parler d'ici peu de ces expériences.

Déjà c'est l'électricité seule qui manœuvre les bateaux sous-marins; il nous convenait donc fort bien de rechercher s'il ne se pourrait pas qu'elle en facilitât aussi la direction.

Il est présumable que si d'ici peu le gyroscope est adopté sur toute la flotte, à sa suite l'électricité y entrera, car, après avoir désiré un agent de contrôle, les marins demanderont, sans nul doute que ce contrôle soit permanent, et l'avenir est au gyroscope électrique. La voie en est tracée pour les inventeurs électriciens; ce qu'on exigera d'eux, désormais, ce ne sera plus l'instrument mathématique et précis que l'on observe dans le cabinet de physique, dans le silence du laboratoire; c'est un appareil résistant, solide, que l'on puisse utiliser dans les hasards d'une traversée, sans avoir à soupçonner ni son exactitude, ni à éprouver sa solidité.

C. CARRÉ

L'ÉETHER ET L'ÉLECTRICITÉ

Ce sujet préoccupe au plus haut degré les physiciens d'aujourd'hui; il s'établit sous nos yeux une synthèse des plus grandioses de notre époque, et de nouveau la question se pose: qu'est-ce que l'électricité? Pendant tout le XIX^e siècle, cette énigme fut l'objet de nombreuses recherches. Les phénomènes électriques ont été bien étudiés; cette étude était devenue déjà très fertile en résultats pratiques, en nous permettant de satisfaire à de multiples besoins, de réaliser les projets les plus fantastiques, et pourtant le mécanisme intime des phénomènes électriques restait toujours un mystère profond.

Je ne dirai pas qu'à l'heure actuelle ce mystère est complètement dévoilé. Il y a vingt-cinq ans, l'initiative dans cette direction a été donnée, et les travaux remarquables de ces deux dernières années ont démontré d'une manière palpable que nous sommes sur le bon chemin, que les bases de la théorie sont bien posées.

L'initiative appartient au génie de Clerc Maxwell, mort il y a déjà une dizaine d'années (le

5 novembre 1879). Si Faraday, avec son flair sans égal, apercevait déjà la bonne voie, il fallait un Maxwell, pour développer ses prévisions et leur donner une forme palpable.

En 1865 parut le mémoire de Maxwell: *La Théorie dynamique du champ électromagnétique*; bientôt après il développa ses idées dans son célèbre *Traité d'électricité et de magnétisme* (1873).

Bien des faits corroboraient déjà à cette époque la théorie de Maxwell, mais les récentes recherches sont pour elle un triomphe tout à fait particulier.

« Il est impossible d'étudier cette théorie étonnante », dit Hertz, « sans éprouver de temps en temps ce sentiment, que les formules mathématiques ont, pour ainsi dire, une vie indépendante, leur propre raison, qu'elles sont plus intelligentes que nous, plus intelligentes que leur auteur même, et qu'elles nous donnent plus que nous n'y avons mis. »

Les idées de Maxwell mettent au premier plan l'éther, le même milieu dans lequel se propagent la lumière et la chaleur. Il est donc naturel de s'attendre à ce que la nouvelle théorie de l'électricité se trouve en contact avec l'ancienne « théorie de la lumière ». Mais ce n'est pas un simple « contact », c'est l'absorption d'une théorie par l'autre: le phénomène ondulatoire, appelé lumière, devient un cas particulier de la mécanique de l'éther, qui embrasse un ensemble de phénomènes, qui à l'heure actuelle porte le nom d'*électromagnétisme*.

La physique traite des différentes formes de l'énergie et de leurs relations réciproques. La matière ordinaire est le véhicule de l'énergie cinétique et potentielle, moléculaire. Les différentes formes de cette énergie et leurs transformations se manifestent à nous dans les phénomènes de l'attraction universelle, dans les actions des forces moléculaires (y compris les phénomènes de l'acoustique), et enfin dans les phénomènes de la chaleur, en tant qu'il s'agit de la chaleur *des corps*, envisagée comme l'énergie des mouvements vibratoires des molécules matérielles.

Dans les cas les plus accessibles à l'étude nous constatons que l'énergie se transmet, d'une partie à l'autre de la matière, *graduellement et successivement*; c'est-à-dire que cette transmission s'effectue au moyen d'un milieu interposé et exige un *temps fini*.

Mais il arrive qu'il est difficile de suivre cette

transmission, soit parce qu'il est impossible de saisir le temps que dure cette transmission, soit parce que nous ne voyons pas la matière ou le milieu qui sert d'intermédiaire. Nous ne pouvons pas nier, *a priori*, la possibilité d'une transmission *directe* de l'énergie à travers l'espace, sans l'intervention d'un milieu interposé; mais nous pouvons affirmer, que si cette action directe a lieu, elle doit être *instantanée*. Telle est peut-être l'attraction universelle. Mais, si nous constatons que la transmission de l'énergie demande un temps fini, même très petit, nous sommes obligés d'en déduire qu'elle s'effectue avec l'intervention d'une matière intermédiaire, et dans les cas où l'observation directe ne nous révèle pas la présence d'aucune matière « ordinaire », nous devons en admettre une autre, une matière « impondérable ».

Pour la première fois, on a été obligé d'admettre l'existence de cette matière particulière, quand on s'occupa de la transmission de la lumière et de la chaleur du soleil et des autres corps célestes à travers l'espace, où il ne pouvait évidemment exister d'autre matière (si ce ne sont des traces de gaz très raréfiés).

La vitesse considérable (de 300000 kilomètres par seconde) de cette transmission et la nature même de ce phénomène, ne permettraient pas d'admettre les gaz comme milieu intermédiaire. Tout prouve, en effet, que le mécanisme de la propagation de la lumière est, dans une certaine mesure, analogue à celui de la propagation du son. Or cette dernière a, dans l'air plus ou moins dense, une vitesse de 300 mètres par seconde, et aucun gaz, aucune matière « ordinaire » ne pourrait atteindre une vitesse 1 million de fois plus grande. La polarisation des ondes lumineuses apporte un autre argument : elle indique que les vibrations du milieu qui transmet la lumière, sont transversales. Or, les gaz et les liquides n'admettent que des vibrations longitudinales.

Il a donc fallu admettre que l'espace est rempli d'un milieu particulier, véhicule des ondes transversales et l'on a donné à ce milieu le nom d'*éther* (1). Nous allons apprendre quelques prop-

(1) Αἴθηρ, provient probablement de αἶθω, je brûle; mais Platon fait provenir le mot éther (dans son *Cratylus*) de son mouvement perpétuel : οὐκ ἔστι περι τον αἶθρα τον αἰσθητην διακωως εν κελουτο. MAXWELL, *Enc. Brit.*, 3^e éd., vol. VIII.

riétés de ce milieu, en étudiant la nature des ondes auxquelles il donne lieu.

La densité de l'éther, quelque petite qu'elle soit, dépasse considérablement celle des gaz qu'on pourrait regarder comme traces des atmosphères très raréfiées des planètes (1).

L'éther nous rappelle, par ses ondulations, non un fluide, liquide ou gazeux, mais plutôt un corps solide élastique; en effet, ce n'est que dans les corps solides que nous trouvons des vibrations transversales. Cette rigidité, cette propriété de résister aux changements de forme pourrait appartenir également à un corps liquide, si ce corps était affecté des mouvements tourbillonnaires.

Les mouvements libres des corps célestes ne sont nullement en contradiction avec cette *quasi-rigidité* de l'éther. L'éther s'entr'ouvre et se ferme, en laissant passer ces corps, comme l'eau laisse passer un filet; l'éther peut aussi être entraîné, en partie, par ces corps, comme l'eau par une éponge. En effet, ces mouvements sont extrêmement lents en comparaison avec les vibrations d'une onde lumineuse. Or, la même matière peut se conduire comme un corps solide vis-à-vis des mouvements très rapides, et comme un corps liquide par rapport à une pression relativement faible.

Le goudron, pour prendre l'exemple d'un corps visqueux, peut devenir un diapason qui résonne comme l'acier; et pourtant, mettez-en une tranche dans un verre contenant de l'eau et vous verrez qu'un bouchon en liège, placé au fond du vase, la traversera lentement et arrivera, dans un temps plus ou moins long, à sa surface, et une balle de plomb la percera rapidement, en tombant de sa surface au fond du vase (2).

L'éther est le véhicule de l'énergie ondulatoire — successivement cinétique et potentielle, en chaque point, — nous appelons cette énergie *rayons lumineux ou calorifiques*. Le mot *lumière* est trop étroit pour désigner cette énergie *rayonnante*, puisque tous les rayons ne sont pas sensibles à l'œil. Il n'est pas commode non plus de lui donner le nom de *chaleur rayonnante*, comme on le fait souvent, parcequ'on appelle chaleur

(1) D'après Thomson, la densité de l'éther dans le système solaire ne doit pas être moindre que la 10^{-18} partie de celle de l'eau.

(2) Sir W. THOMSON, *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics*, 1884.

soit cette forme particulière de l'énergie (purement cinétique) qui a engendré le rayon, soit celle qui apparaît lorsque le rayon est absorbé par un corps dont il élève la température.

Le rayon est une forme transitoire de l'énergie ; il peut redevenir énergie, mais il peut aussi se transformer en travail mécanique (chaleur « latente ») ou chimique.

On divisait autrefois les rayons en calorifiques, lumineux et chimiques (1). On sait maintenant que chaque rayon peut produire une action calorifique et chimique ; ce n'est que l'action lumineuse qui reste le privilège exclusif des ondes de la partie moyenne du spectre, de celles qui font de 400.10^{12} à 800.10^{12} vibrations par seconde. Tous les autres rayons ne peuvent agir sur la rétine que lorsqu'ils ont été préalablement transformés en rayons de ce type particulier.

La lumière n'est qu'une petite portion des ondes que nous envoie le soleil ; pour s'exprimer comme en l'acoustique, c'est approximativement une des six octaves du spectre solaire.

M. Langley a trouvé dans la partie obscure du spectre infra-rouge des astres et des corps terrestres des « notes » relativement basses, de 15.10^{12} par seconde (avec une longueur d'onde = $1/50$ mm, tandis que la partie ultra-violettes du spectre solaire contient des ondulations de 1000.10^{12} vibrations par seconde, avec une longueur d'onde = $0,000290$ mm.

Notre atmosphère ne laisse pas passer des ondes plus « basses » ou plus « hautes » venant des étoiles, mais dans le spectre de l'arc voltaïque la limite supérieure se trouve encore reculée d'une quinte (la longueur d'onde atteint $0,000180$ mm.) Les limites connues s'élargiront, sans doute, lorsque nos moyens d'observation seront encore plus perfectionnés.

L'éther remplit tous les pores des corps — ces espaces intermoléculaires existent toujours quelle que soit la continuité apparente de la matière — et il est d'une certaine manière, faiblement lié avec la matière pondérable.

Dans les corps plus ou moins transparents, il conserve encore sa propriété de propager certaines ondes, mais, devenu plus dense ou moins élastique, il les transmet avec une vitesse moindre

qui dépend aussi de la longueur d'onde. L'indice de réfraction est inversement proportionnel à la vitesse de la propagation.

Dans les corps opaques, l'énergie rayonnante est absorbée par leur couche superficielle (qui est toujours plus ou moins transparente); les ondes rencontrant un certain obstacle à leur propagation s'y éteignent; l'énergie rayonnante se transforme alors en chaleur, nouvelle forme de l'énergie de la matière pondérable de l'éther.

L'étude de l'énergie rayonnante nous oblige à reconnaître l'existence de l'éther ; elle la démontre et nous en verrons, dans la suite, de nouvelles preuves.

C'est un scepticisme par trop exagéré qui pousse quelques-uns, même aujourd'hui, à regarder l'éther lumineux comme quelque chose d'hypothétique. En l'état actuel de la science l'éther n'est pas une hypothèse, mais une réalité, comme l'eau et l'air.

Pour Sir W. Thomson l'éther est même la seule substance dont nous sommes obligés de reconnaître l'existence.

Ce ne sont que les abus, auxquels ce mot a donné lieu, qui peuvent expliquer cette méfiance, cette « peur de l'éther » qui comme « une espèce de préjugé héréditaire » se rencontre même chez M. Stuart Mill (1).

Nous sommes encore loin de connaître complètement les propriétés de l'éther et pourtant, fait remarquer Thomson, nous le connaissons mieux, sous certains rapports, que tout autre matière (2).

La connaissance imparfaite de la matière « ordinaire » nous empêche même, dans une certaine mesure, de nous familiariser avec l'éther ; c'est surtout l'éther emprisonné dans les corps, qui nous embarasse le plus. L'éther libre de l'espace est probablement la forme la plus simple de la matière.

Nos connaissances sur l'éther étaient condamnées à rester très restreintes aussi longtemps qu'elles avaient pour source unique les phénomènes du rayonnement. La notion même de l'onde éthérienne a été peut-être trop étroitement définie dans la théorie de la lumière, développée

(1) L'expression « rayons actiniques » qu'on emploie souvent est un pléonasme amusant.

(1) MAXWELL. — Voir *Enc. Brit.* 9^e édition, vol. VIII, p. 567.

(2) *Lectures de Baltimore*, p. 9.

par Fresnel. Retenons de cette notion (que l'on pourra élargir quand d'autres considérations l'exigeront) ses côtés essentiels : la périodicité et le caractère transversal des vibrations.

« Si l'éther existe — dit Faraday — il doit avoir encore d'autres fonctions que celle de la transmission des radiations⁽¹⁾ ». Quelles sont ces fonctions ?

Nous allons les examiner.

Sous le nom « électricité »⁽²⁾ ou, plus généralement « électromagnétisme » nous entendons tout le reste, pour ainsi dire, de la physique, tout le domaine des transformations diverses de l'énergie, dont l'ordre et la succession ne peuvent être expliqués ni par les propriétés de la matière pondérable, ni par l'énergie rayonnante de l'éther. Mais ici il faut bien faire une distinction entre le côté visible du phénomène et le côté intime et caché.

Quand nous faisons des expériences électromagnétiques, quand nous assistons au fonctionnement d'un télégraphe ou d'une machine dynamo nous avons devant nous une série de phénomènes qui individuellement nous sont connus.

Nous observons certains mouvements des corps, un développement de lumière ou de chaleur, certaines réactions chimiques. Dans tous ces phénomènes, pris isolément, il n'y a, pour ainsi dire, rien « d'électrique » et nous pourrions les reproduire aussi bien, par un autre moyen, sans l'intervention de cette « électricité. »

Mais l'enchaînement de ces phénomènes, leur évolution réciproque se présente dans ces expériences sous une forme telle, que nous sommes obligés de reconnaître, derrière ces phénomènes, la présence de certaines formes transitoires de l'énergie comme l'action du rayon du soleil nous a conduits à la constatation de l'existence des ondes éthériennes.

Mais, tandis que, dans les ondes lumineuses, un organe particulier — la vue — nous a aidés à saisir l'énergie rayonnante, aucune sensation particulière ne nous révèle cette forme particulière de

l'énergie qui se cache derrière les phénomènes électriques et magnétiques.

Ce que nous observons, ce que nous analysons, ce sont les résultats, les produits de la destruction de cette forme particulière de l'énergie. Nous verrons, dans la suite, quelle restriction il faut donner à ces mots.

En étudiant de plus près ce groupement mystérieux de transformations de l'énergie, auquel nous donnons le nom d'électricité, nous y trouvons, au fond, deux formes transitoires que nous appelons : l'une, énergie *électrique*, l'autre, énergie *magnétique*. Elles sont liées entre elles d'une manière assez compliquée.

Dans un milieu contenant des corps immobiles chargés de quantités invariables d'électricité, ce sont les forces électriques (ou électrostatiques) qui se manifestent

Mais, si les corps électrisés sont en mouvement ou s'il se produit un mouvement de l'électricité (courant électrique), des forces *magnétiques* (ou électro-cinétiques) apparaissent⁽¹⁾.

A. STOLETOW.

(A suivre.)

LES PHOTOMÈTRES

1. *La Lumière Électrique* a constamment donné, au fur et à mesure de leur apparition, la description de la plupart des appareils photométriques récents ; notre journal a également analysé, avec régularité, tous les travaux photométriques de quelque importance, qui ont été publiés dans ces dernières années.

Mais, jusqu'à maintenant, il n'a été publié aucune étude systématique des appareils photométriques, destinée à relier, en quelque sorte, les nombreuses notes éparses dans les trente-quatre volumes de la collection, et en même temps à présenter un tableau systématique des appareils et des méthodes. Nous avons essayé de combler cette lacune en groupant, dans le cadre de deux ou trois articles, la descrip-

(1) FARADAY, — *Exper. resarches in Electr.* § 3175.

(2) Le mot fut introduit dans la science par Gilbert (1600)

« V. m. illam electricam nobis p'acet appellare. »

(1) Cet article a fait le sujet d'une conférence, faite par l'auteur devant le Congrès des naturalistes russes, à Saint Pétersbourg.

donne naissance à deux courants induits successifs, et de sens contraire, par suite de l'approche et de l'éloignement de la masse; on obtient donc autant d'émissions de courants alternatifs qu'il y a de roues dans le train qui passe vis-à-vis de l'appareil.

Le fil des bobines est de 0,14 mm.; il fait, sur chacune d'elles, 18000 tours et constitue une résistance de 3780 ohms, soit 7560 ohms pour l'ensemble de l'appareil. La boîte est faite d'une seule pièce, fermée à la soudure, et elle est remplie de paraffine pour éviter l'introduction de l'eau, qui nuirait au bon fonctionnement de l'aimant.

Quant au récepteur, qui procède du relais pola-

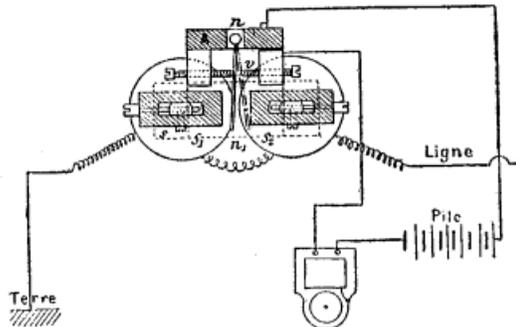


Fig. 9. — Récepteur.

risé de Siemens, il se compose d'une armature nn_1 (fig. 9), montée à pivot sur le pôle n d'un aimant coudé A, et représentant un pôle nord oscillant entre les deux pôles sud s des noyaux d'un électro-aimant $s_1 s_2$, qui est fixé, par sa culasse, sur l'extrémité de l'aimant A. Au repos, l'armature nn_1 est, comme l'indique la figure en traits pleins, légèrement inclinée à gauche. Le courant envoyé dans le récepteur par l'approche de la première roue a pour effet de renforcer s_2 et d'affaiblir s_1 ; l'armature n_1 se trouve donc attirée vers s_2 , et prend la position indiquée en traits interrompus, où elle reste butée contre la vis v . Lorsque la roue s'éloigne, il se produit un effet inverse, mais qui est insuffisant pour ramener n à sa position normale; le contact de n avec v , qui ferme le circuit local d'une pile et d'une sonnerie de relais, dure donc jusqu'à ce qu'on ramène, à la main, l'armature à sa position initiale, à l'aide d'un bouton manœuvré de l'extérieur de la boîte qui renferme le récepteur.

Les bobines de cet électro-aimant sont entou-

rées de fil de 0,08 mm. de diamètre, elles ont chacune 18000 tours et présentent une résistance de 3460 ohms, soit au total 6920 ohms; elles sont accouplées en tension.

Cette sensibilité du récepteur est motivée parce que les indications doivent correspondre à des vitesses de passage très variables, et parce que les bandages, quoiqu'ils aient une masse à peu près constante dans leur partie active, s'approchent plus ou moins des pôles selon le degré de leur usure, et suivant que la voie est en alignement ou en courbe.

Cette idée est originale et ingénieuse; on ne peut guère reprocher à ce genre de contact que d'être actionné par le passage de tous les véhicules, quel que soit le sens de leur marche, comme cela se produit avec les pédales.

Les expériences auxquelles l'appareil a été soumis à Bercy, sur le réseau de Paris-Lyon-Méditerranée, paraissent démontrer que, malgré sa sensibilité, l'appareil n'est pas actionné par le passage d'un train sur une voie voisine de celle contre laquelle est installé ce commutateur.

M. COSSMANN.

L'ÉTHER ET L'ÉLECTRICITÉ (1)

Nous considérons, depuis Ampère, les aimants comme des systèmes de courants électriques élémentaires.

L'électrostatique nous fut connue la première: ce fut l'objet de nos recherches de prédilection.

L'interprétation de ces phénomènes sembla facile; sous l'influence du livre immortel de Newton elle prit la forme de la théorie de l'attraction universelle. Dans ces deux branches, on accepta, à la base, des forces instantanées agissant à distance; la loi même de l'action de ces forces rappela celle de la gravitation de Newton.

Il a fallu, cependant, attribuer ces forces aux fluides *sui generis*, aux fluides électriques résidant à l'intérieur de la matière ordinaire et capables de se déplacer à travers la matière, avec plus ou moins de facilité, sous l'influence des forces électriques.

(1) *La Lumière Électrique*, 15 mars 1890, p. 517.

On a envisagé de la même manière les phénomènes purement magnétiques jusqu'au jour où Oerstedt et Ampère les ont liés à la théorie du courant électrique.

Stephen Gray observa le premier, en 1729, que l'électricité pouvait se propager, couler pour ainsi dire dans les *conducteurs* et il partagea les corps en *conducteurs* et *isolants*.

Volta signala, la première année de notre siècle (1800), une puissante source d'un courant continu dans la batterie galvanique.

Ohm donna une théorie des courants constants, dans un circuit conducteur, en se guidant par leur analogie avec les courants de chaleur.

Oerstedt, Ampère (1820) et Faraday (1831) découvrirent les actions extérieures du courant, l'*électromagnétisme*, dans le sens restreint de ce mot.

Les courants d'induction de Faraday parurent très aptes à fournir des applications techniques: nous les utilisons aujourd'hui dans nos machines dynamo-électriques.

Peu à peu, le tableau compliqué des actions du courant occupa la place du schéma relativement pauvre des phénomènes électrostatiques.

Ce sont les actions de ces courants qui engendrent ces transformations de l'énergie, qui sont liées dans notre pensée avec la notion de l'électricité.

Même dans la plupart des expériences électrostatiques (mouvements électriques des corps légers, étincelles, etc.) nous avons, à proprement parler, des phénomènes du courant électrique.

L'ancienne théorie fut impuissante à expliquer les propriétés du *champ électromagnétique*; c'est ainsi qu'on nomme l'espace où se manifestent les actions du courant électrique.

Il fut difficile de localiser l'énergie d'un courant, d'indiquer les centres des forces agissantes. La simple loi du carré des distances n'embrassait pas tous les phénomènes, et les tentatives pour la compléter (la loi de Weber) n'inspiraient pas beaucoup de confiance à cause de leur forme bizarre et trop compliquée; l'idée que les corps isolants ne participent pas aux phénomènes électriques ne put pas subsister après les expériences de Faraday; l'action à distance et instantanée devenait de plus en plus douteuse, il n'y avait aucun espoir de démontrer la matérialité de l'électricité.

Tout indiquait qu'il fallait envisager autrement la question. Faraday poursuivait depuis longtemps

l'idée qu'il fallait concentrer son attention non sur les corps « conducteurs », mais sur le milieu ambiant isolant, qu'il appelait milieu diélectrique (1).

Penétre des idées de Faraday, auxquelles il donna une forme mathématique, Maxwell proposa sa « théorie dynamique du champ électromagnétique ».

Pour donner la topographie, pour ainsi dire, du champ électromagnétique, Faraday et Maxwell y tracent des lignes de force. Si nous suivons, à partir d'un point quelconque du champ, la direction de la force électrique, nous décrivons une ligne de force électrique; en suivant de même la direction de la force magnétique, nous traçons une ligne de force magnétique. On trouve que les lignes de force électriques et les lignes de force magnétiques se coupent toujours sous un angle droit. Le champ se trouve ainsi divisé par les lignes de force en filets ou en tubes de force.

On peut construire ces tubes de force de telle manière que leur densité (le nombre de lignes de force passant par l'unité de surface de section du tube) soit à chaque point du champ proportionnelle à la grandeur de la force.

Dans un champ électrostatique, toute ligne de force commence en un point qui possède une « charge » positive et aboutit à un point chargé négativement, et comme à l'intérieur des corps conducteurs il n'y a ni charges électriques ni forces électriques, — on n'y trouve donc pas non plus de lignes de force.

Au voisinage d'un fil métallique, qui ferme le circuit d'une pile électrique, les lignes de force électriques sont parallèles au fil, mais les lignes de forces magnétiques forment des anneaux circulaires, enfilés le long du fil.

Cette simple représentation graphique avait, aux yeux de Faraday, un sens profond. Pour lui, la matière du champ magnétique est un mécanisme complexe dont toutes les parties sont reliées entre elles et qui rappelle, non le système planétaire de Newton, dans lequel les centres de force agissent à distance, sans l'intervention du milieu ambiant, mais plutôt un réservoir contenant de l'eau et des corps plongés dans l'eau, où tout mouvement se propage dans toutes les di-

(1) « J'appelle *diélectrique* une substance, à travers laquelle agissent les forces électriques. » (Faraday).

rections et se manifeste plus ou moins dans tous les points du milieu.

Pour bien comprendre l'action des forces agissant dans un champ électro-magnétique, nous devons avoir en vue l'état de la matière dans tous les points du champ et réciproquement, la topographie de ces forces nous indique l'état de la matière.

Dans le domaine purement mécanique, la force apparente n'est pas, non plus, toujours l'indice d'une action à distance; elle peut résulter des actions locales ou des actions du milieu ambiant s'étendant à une partie considérable de l'espace.

Un corps tournant se trouve sous l'action des forces centrifuges; toutes ses parties sont, pour ainsi dire, repoussées de l'axe de rotation.

Un cerceau conserve sa position verticale aussi longtemps qu'il tourne; il y a une force qui l'empêche de tomber; mais il tombe dès qu'il s'arrête. Ici les quasi-forces naissent de l'acte même du mouvement; ces forces n'existaient pas quand le corps était en repos.

Un corps léger surnage à la surface de l'eau, un aérostat monte dans l'air. Sont-ils repoussés par la terre? Évidemment, non! La source de cette poussée se trouve dans le milieu environnant; toute portion de l'eau ou de l'air comprimé possède une certaine énergie, et c'est cette énergie du liquide ou de l'air qui se manifeste dans la force qui tend à pousser de bas en haut le corps plongé.

On peut communiquer à l'eau ou à l'air un mouvement tourbillonnaire. On obtient grossièrement ces tourbillons en fumant. En observant deux anneaux, on constate que tantôt ils s'attirent, tantôt ils se repoussent. Ces réactions apparentes entre les anneaux résultent de l'énergie cinétique appartenant à toutes les parties du milieu *environnant*.

Enfin, dans les expériences élégantes de Bjerknes, les corps plongés dans l'eau agissent mutuellement et ces actions rappellent de très près le jeu des forces électriques et magnétiques. On communique aux corps plongés des mouvements très petits et très rapides — des oscillations ou des pulsations. Il est facile de se convaincre que les particules de l'eau ambiante éprouvent aussi des oscillations pareilles. Les actions réciproques que nous observons entre les corps plongés ont donc pour source l'énergie de ces petits mouvements qui ont été communiqués aux corps plongés, et qui se sont transmis au milieu ambiant.

Nous aurions créé une théorie tout-à-fait artificielle et insuffisante si, dans tous les phénomènes que nous venons d'indiquer, nous avions concentré toute notre attention sur les attractions ou répulsions visibles, sans tenir compte des mouvements et de la déformation du milieu dans lesquels siège la véritable explication de ces phénomènes.

N'y a-t-il pas lieu d'envisager de la même manière le champ électro-magnétique? Sa polarité ne serait-elle pas le résultat de la polarité moléculaire? Pour les aimants, on sait depuis longtemps que chaque particule est un petit aimant: l'expérience de la division d'un aimant nous en donne la preuve. Or, il n'est pas difficile d'étendre ce mode de raisonnement.

On peut regarder un tube de force (électrique ou magnétique) comme une série des molécules polarisées (électrisées ou aimantées), enfilées le long d'une ligne de force et réunies deux à deux par leurs pôles de noms contraires.

Ce n'est pas tout.

Qu'est-ce que la polarité d'une molécule? Que veut dire: la molécule est électrisée ou aimantée? Le rôle mécanique de cette molécule, dans ce mécanisme compliqué qui se nomme le champ électro-magnétique, doit résulter de l'état mécanique effectif de la molécule elle-même, de sa déformation et de son mouvement actuel.

Faraday se représentait déjà que tout tube de force d'un champ électro-magnétique est tendu suivant sa longueur et subit des pressions latérales exercées par les tubes voisins; ou, autrement, que toute molécule polarisée tend à se contracter le long de la ligne de force et à se détendre transversalement. Maxwell démontra que cette conception du champ électromagnétique correspond exactement aux forces qui s'y manifestent en réalité.

Un pareil tableau du champ électromagnétique, tout loin qu'il soit d'une netteté parfaite, nous rend un grand service.

Mais remarquons avant tout qu'il se trouve en contradiction flagrante avec les idées courantes sur le rôle des corps conducteurs et isolants.

Prenons d'abord les phénomènes électrostatiques.

Nous sommes habitués à parler des « conducteurs chargés », quoique nous sachions depuis longtemps que les « charges » se portent, en réalité, à la surface de séparation du conducteur et de l'air ambiant ou d'un autre diélectrique (plus généralement à la surface de séparation de deux

corps hétérogènes). Les corps conducteurs ne contiennent pas des lignes de force : ces lignes ne parcourent que les diélectriques ; elles s'arrêtent à l'entrée d'un conducteur.

D'après Maxwell et Faraday, nous devons attribuer au milieu diélectrique toute l'énergie électrique, toute cette perturbation moléculaire, au moyen de laquelle on explique les propriétés du champ électrostatique.

Le conducteur apparaît alors comme une partie de l'espace où cette forme de l'énergie ne peut pas pénétrer. Au lieu de dire : « le conducteur est chargé » nous devrions dire : « l'air ambiant est chargé de l'énergie. »

Et il n'est pas difficile de voir qu'une telle conception a, pour elle, une très grande probabilité physique.

A l'intérieur d'un conducteur, la matière ne subit, par suite de son électrisation, aucune variation, ni de sa température, ni de sa structure moléculaire.

Il est indifférent de quel métal le conducteur est fait : un conducteur de platine et d'aluminium ayant les mêmes dimensions et la même forme, recevront la même charge électrique, si on les met en communication avec la même source d'électricité, et leurs actions électrostatiques seront identiquement les mêmes (1).

Mais nous observons un phénomène différent quand nous examinons le corps isolant environnant. Les forces électriques varient, si nous remplaçons l'air par un autre gaz ; elles varient encore plus, si nous remplaçons l'air par un corps diélectrique liquide ou solide (soufre, paraffine, verre, etc.) Enfin, l'expérience directe prouve que les forces électriques produisent, dans un diélectrique, des tensions, des changements de structure : le verre d'une bouteille de Leyde, quand elle est chargée, devient plus épais, le verre et même les diélectriques liquides présentent, sous l'action des forces électriques, le phénomène de la double réfraction, comme certains cristaux.

Tous ces faits prouvent que dans les phénomènes électrostatiques, le rôle exclusif appartient au milieu diélectrique. Or, « le vide » peut aussi jouer le rôle de ce milieu ; il est, lui aussi, le véhicule de l'énergie électrostatique, car nous

(1) On peut négliger « l'électricité de contact » quand il s'agit de charges considérables.

savons que ce quasi-vide est rempli d'une matière particulière, l'éther.

Mais alors le rôle principal dans les diélectriques appartient aussi à l'éther emprisonné ; et les « conducteurs » seront des corps, à l'intérieur desquels l'éther perd sa propriété de se polariser électriquement.

Voilà comment on arrive à établir la première liaison entre les phénomènes électriques et ceux de la radiation.

Le même milieu — l'éther libre ou l'éther des corps transparents — apparaît comme le véhicule de ces deux formes de l'énergie. En effet, la plupart des corps isolants (l'air, la benzine, le verre, etc.) sont des corps plus ou moins transparents, par rapport à ces deux espèces de rayonnement.

Les meilleurs « conducteurs », les métaux, sont opaques : ils ne laissent pas pénétrer l'énergie électrostatique, comme ils sont impénétrables pour les rayons lumineux.

Prenons maintenant le champ électromagnétique produit par un courant électrique. Ici encore, nous sommes en contradiction absolue avec les idées courantes, ce qu'il est déjà facile, d'ailleurs, de comprendre.

Nous sommes, en effet, habitués à regarder le fil conducteur comme un canal, à l'intérieur duquel coule l'électricité.

Mais, si nous renonçons à regarder l'électricité comme une matière, cette phrase ne peut avoir qu'un sens conventionnel, figuré, exactement comme on parle du *mouvement* d'une onde, de la chaleur, de l'énergie. Chacune de ces expressions symboliques suppose toujours un certain mouvement réel ; dans le cas d'un courant électrique, il doit y avoir un certain mouvement de la matière, le courant étant un phénomène *cinétique*.

L'expérience directe (Rowland) a montré qu'en faisant mouvoir un corps chargé d'électricité, nous provoquons des forces magnétiques dans le milieu environnant : le *mouvement visible de la matière* agit ici comme un *courant électrique*.

La propriété que possède le courant de dévier le plan de polarisation de la lumière (expérience de Faraday) prouve aussi, d'après Thomson, que le courant est un phénomène cinétique.

Mais les mots : *l'électricité coule dans un fil*, ou *le courant circule*, ne nous indiquent nullement ni quelle est la matière qui se meut, ni quel est le

mode de ce mouvement, ni, enfin, comment ce mouvement se propage.

Le courant électrique est un changement de la polarité électrostatique du champ et ce changement est accompagné de forces magnétiques.

Dans une décharge d'une bouteille de Leyde, un courant instantané aboutit à la destruction de l'état électrique ; dans un courant stationnaire d'une pile galvanique, une décharge continue est accompagnée d'une nouvelle charge aussi continue.

En admettant que les phénomènes électrostatiques représentent l'énergie moléculaire de l'éther, nous devons envisager le champ électromagnétique comme les courants de cette énergie de l'éther.

La distribution des lignes de force doit nous indiquer le siège de cette énergie et les lignes de son transfert.

En suivant ces indications, il faudra attribuer l'énergie électromagnétique à l'éther des conducteurs (du circuit) et à l'éther du milieu ambiant (de l'air). Telle est l'opinion de Maxwell. Un de ses disciples, M. Poynting (1), indique d'une manière plus précise le rôle des conducteurs ; je me permettrai de donner à ses idées un plus grand relief.

Les conducteurs métalliques sont des *destructeurs, extincteurs* de l'énergie électromagnétique. Dans les conducteurs métalliques, parfaitement homogènes, d'un courant électrique, se développe la *chaleur* : cette chaleur représente leur part de l'énergie.

Mais cette chaleur n'est plus cette forme particulière de l'énergie électromagnétique que nous trouvons dans le milieu ambiant ; si nous appelons cette chaleur, ou plutôt le rayonnement de cette chaleur, énergie électromagnétique, ce n'est qu'au point de vue général que nous découvrirons plus loin.

Aucune expérience n'a encore prouvé que le courant produise sur le métal un autre effet que l'élévation de sa température ; quelques effets observés sur les fils conducteurs (variations de l'élasticité, élongations, etc...), peuvent être expliqués par l'action de la chaleur.

Le rôle du métal, comme extincteur de l'énergie électromagnétique, devient surtout clair, quand on fait l'étude des courants alternatifs :

ces courants ne pénètrent pas à l'intérieur du métal ; ils s'éteignent à une profondeur d'autant plus petite, que les alternances du courant sont plus rapides.

Les expériences récentes de M. Hertz (1) sur les courants alternatifs ont montré, d'une manière directe, qu'ils s'arrêtent dans une couche métallique extrêmement mince (1/20 mm.) et qu'ils ne pénètrent pas plus profondément. Même, les courants alternatifs moins rapides, ceux des machines dynamo-électriques, circulent à la surface extérieure du conducteur s'il est assez épais ; ainsi, dans un conducteur en cuivre de 10 centimètres de diamètre, la densité d'un courant, à 80 alternations par seconde, devient 7 1/2 0/0 à 1 centimètre de profondeur, et la résistance apparente du conducteur est presque 4 fois (3,8) plus grande que celle qu'il possède avec un courant ordinaire (2).

Comme l'air, le duvet, etc., sont des corps non conducteurs de la chaleur, nous devons également appeler les métaux, non-conducteurs de l'énergie électro-magnétique. D'après M. Poynting l'énergie d'un courant galvanique se propage dans le milieu diélectrique (ordinairement c'est l'air) ; la ligne de cette propagation forme un angle droit avec les lignes de forces électriques et magnétiques. En partie, cette énergie glisse, pour ainsi dire, le long des surfaces métalliques ; en partie, elle s'en va dans le milieu environnant, et, rencontrant un métal, y pénètre par différents points, en se transformant en chaleur (3).

Ainsi, contrairement aux idées courantes, la propagation de l'électricité dans un fil télégraphique aérien se fait *dans l'air* et dans un câble souterrain ou sous-marin, c'est dans le *corps isolant* du câble, ou, plus exactement, dans l'éther de ces diélectriques.

Le conducteur fermant le circuit est essentiellement nécessaire pour obtenir un courant, mais son rôle n'est pas celui qu'on supposait jusqu'aujourd'hui.

Le conducteur est nécessaire pour éteindre l'énergie électromagnétique, sans son intervention, un état électrostatique s'établirait ; par sa

(1) POYNTING, *Phil. Trans.*, 1884-85.

(1) HERTZ. — *Annales de Wiedemann*, t. XXXVII, 1889.

(2) W. THOMSON. — *Ether, Electricity and Ponderable Matter*, (1889).

(3) Voir aussi LODGE. — *Phil. Mag.*, (5), vol. 19, 1885.

présence, il détruit l'équilibre en absorbant sans cesse l'énergie, et en la transformant en chaleur, il provoque une nouvelle activité de la source (la pile) et soutient ainsi cette affluence continue de l'énergie électromagnétique que nous appelons « courant ». Il est vrai, d'un autre côté, que le conducteur dirige, pour ainsi dire, et rassemble cette énergie en la faisant glisser le long de sa surface, et à ce point de vue, il justifie un peu son nom traditionnel.

Le rôle d'un fil conducteur nous rappelle un peu la mèche d'une lampe allumée; la mèche est indispensable, mais ce n'est pas elle qui est la source de l'énergie chimique, la matière combustible; celle-ci l'entoure: la mèche est l'endroit où a lieu la destruction de la matière combustible, elle en absorbe continuellement de nouvelles provisions et entretient ainsi une transformation continue et graduelle de l'énergie chimique en chaleur.

Ce qui vient d'être dit des métaux ne pourrait pas être appliqué littéralement à ces conducteurs composés, en général liquides, qui sont décomposables par le courant. Ces corps (électrolytes) sont, pour ainsi dire, des termes moyens entre les métaux et les diélectriques et ils sont généralement, dans un circuit fermé, des sources du courant, des générateurs de l'énergie chimique qui se transforme en énergie électromagnétique. Quel est l'endroit précis où cette transformation a lieu? Où est engendrée l'énergie électromagnétique? Cette question séculaire n'est pas encore complètement résolue.

Lodge pense que les lignes d'énergie électromagnétique dans une pile de Volta (zinc, eau, cuivre) commencent surtout aux surfaces immergées du zinc, mais qu'une dérivation de cette énergie dans le milieu environnant a lieu à la soudure de deux métaux.

Nous pouvons donc résumer nos considérations de la manière suivante:

1° Les corps diélectriques, ou plutôt l'éther qui les remplit (et qui est modifié par eux), sont les propagateurs de l'énergie électromagnétique.

2° Cette énergie est distribuée, d'une manière continue, dans tout le milieu diélectrique et elle dépend des déformations et des mouvements des parties élémentaires du milieu.

3° Les « conducteurs métalliques de l'électricité » ne conduisent pas l'énergie électromagnétique: celle-ci, en pénétrant dans les conducteurs, se transforme en énergie calorifique.

Ces trois propositions restent littéralement exactes, si nous remplaçons « l'énergie électromagnétique » par l'énergie « rayonnante ». Ces deux formes de l'énergie, si distinctes en apparence, résident dans le même milieu; elles ont chacune un caractère moléculaire, cinétique et potentiel.

Ne pourrait-on alors s'attendre à trouver une relation intime entre ces deux formes de l'énergie? Ne pourrait-on pas créer, au moyen d'un rayon, un phénomène électrique, et, réciproquement, au moyen d'un phénomène électrique, réaliser un rayon ou quelque chose de semblable.

Il s'agit ici, naturellement, des transformations *immédiates*, parce que nous savons qu'on peut transformer indirectement toute forme de l'énergie en une autre forme quelconque.

L'appareil thermo-électrique de Melloni nous montre déjà que les rayons peuvent devenir la cause d'un courant. Mais ici l'énergie rayonnante se transforme d'abord en chaleur (à la soudure), et le courant est engendré indirectement; on obtiendrait le courant avec tout autre mode d'échauffement de la soudure.

Les expériences de Becquerel et d'autres ont montré que deux métaux hétérogènes forment dans un électrolyte liquide un couple galvanique, lorsque l'un de ces métaux est éclairé; les détails de ce phénomène font penser qu'il a lieu par l'intermédiaire de l'énergie chimique.

Mais c'est surtout dans l'air et, en général, dans les gaz, que ces phénomènes sont frappants. Les rayons, surtout les rayons ultra-violet, déchargent un corps chargé négativement, et chargent positivement un corps neutre. On observe ces actions avec toutes sortes de corps, liquides et solides, dans des gaz très divers, à la seule condition que la couche superficielle des corps absorbe les rayons actifs. Ces phénomènes ont été étudiés pour la première fois par M. Hertz (1887) et, depuis, par plusieurs savants et par moi-même⁽¹⁾ et restent toujours obscurs.

(1) STOLETOW. — *Recherches actino-électriques*. Voir *La Lumière Électrique*, t. XXXIV, p. 516, 1889.

On ne sait pas encore, si cette fois, la transformation de l'énergie rayonnante en énergie électrique est directe, ou si elle s'opère au moyen d'un agent intermédiaire.

Quoiqu'il en soit, la suite nous montrera que le rayon porte toujours en lui des courants électriques, mais ces courants ne se manifestent pas comme tels à cause de leur nature toute particulière.

Passons à l'autre côté de la question, passons des phénomènes « actino-électriques ⁽¹⁾ » aux phénomènes « électro-actiniques ».

Faraday a montré (1845) que nous pouvons modifier les propriétés du rayon, en les soumettant à l'action du courant électrique; les forces magnétiques dévient le plan de polarisation du rayon.

Peut-on créer un rayon avec l'énergie électrique ?

Au premier abord, il semble que la question soit inutile; nous le faisons dans toute lampe électrique; un courant élève la température des conducteurs et leur fait émettre des rayons calorifiques. Mais, ici encore, nous avons une transformation indirecte, et ce n'est pas d'elle qu'il s'agit maintenant. Peut-être avons-nous une transformation directe dans les tubes de Crookes; mais ce phénomène n'est pas encore assez élucidé.

Y a-t-il un moyen quelconque de donner sciemment à l'acte de la propagation du courant électrique une forme qui aurait une ressemblance avec le rayon de lumière ?

Maxwell (1865) aborda théoriquement cette question et trouva un résultat d'une importance considérable.

Après avoir donné une forme mathématique aux lois du champ électro-magnétique, Maxwell se demanda :

Comment doit se propager l'énergie d'un courant alternatif à travers un milieu diélectrique ?

La bobine de Ruhmkorff, les courants alternatifs d'une dynamo, le téléphone, enfin les oscillations mécaniques d'un corps chargé nous donnent des exemples de courants de cette nature. Chacun de ces appareils peut servir comme source des perturbations électromagnétiques dans l'éther du milieu environnant.

⁽¹⁾ Ce mot a été introduit dans la science par M. Stolew.

Quel sera le mode de transmission de ces perturbations ?

Voilà quelle fut la réponse :

1. L'énergie se propage sous forme d'une onde transversale, avec une vitesse qui dépend des propriétés électromagnétiques du milieu.

Suivant chaque ligne, issue de la source de ces courants alternatifs, se propagent successivement des courants semblables, ou des « oscillations périodiques de l'électricité » dont la direction est perpendiculaire à ces lignes.

La force électrique qui se développe en même temps est dirigée le long des oscillations, la force magnétique fait avec celle-ci un angle droit. Les trois lignes : la ligne de la propagation de l'énergie, la direction de la force électrique et la direction de la force magnétique, sont perpendiculaires entre elles. (Nous avons déjà vu que ceci a lieu dans chaque phénomène électromagnétique).

2. En calculant la vitesse de la propagation de cette « onde électrique » dans l'éther de l'air (ou, ce qui revient au même, dans l'éther libre), on trouve 300 000 000 mètres par seconde. Or, le même nombre représente aussi la vitesse de la lumière dans le même milieu.

Pour les autres corps transparents, la vitesse de la lumière est inversement proportionnelle à leur indice de réfraction. Pour les ondes électriques, la vitesse de propagation doit être, théoriquement, inversement proportionnelle à la racine carrée du « coefficient diélectrique » du milieu. Mais, si nous comparons l'indice de réfraction avec la racine carrée du coefficient diélectrique (nous connaissons, l'un et l'autre, par l'expérience), nous trouvons qu'ils sont presque égaux entre eux. Pour les gaz et autres corps diélectriques parfaits (soufre, pétrole, paraffine) la coïncidence est parfaite. Pour des diélectriques moins parfaits (admettant le phénomène de l'absorption) et surtout pour les électrolytes, les nombres ne coïncident pas, pour des raisons particulières; mais cette discordance disparaît quand on mesure le coefficient diélectrique à l'aide de courants diélectriques assez rapides ⁽¹⁾.

Enfin, quand on examine les cristaux présentant le phénomène de la double réfraction (soufre),

⁽¹⁾ C'est ainsi que la discordance très prononcée pour le verre a été dernièrement écartée par les expériences de J.-J. Thomson, qui s'est servi d'oscillations électriques d'une période très courte (*Proceed. Royal Soc.*, 1889).

dans lesquels la vitesse de la lumière varie avec la direction, on observe la même variation pour la vitesse de l'onde électrique.

Nous arrivons, en général, à cette conclusion, que la vitesse de l'onde électrique et celle de la lumière, dans le même corps, dans la même direction et pour la même longueur d'onde, sont égales entre elles.

Ces résultats sont frappants. Maxwell les a théoriquement découverts et prédits.

Jusqu'à ces derniers temps personne n'avait mesuré, par l'expérience directe, la vitesse d'une onde électrique : on l'évaluait d'après les valeurs du coefficient diélectrique ; personne n'avait observé la transmission de l'onde électrique à travers un milieu diélectrique.

Il restait donc à vérifier les prévisions de la théorie.

Cette victoire importante de la science a été emportée par les expériences brillantes de M. Hertz, en 1888 et 1889⁽¹⁾.

La difficulté du problème semblait insurmontable. Si l'onde électrique se propage avec la même vitesse que la lumière, il est peu probable qu'on puisse la mesurer *directement*, d'autant plus que, cette onde, comme nous le verrons, « s'éteint » à une distance assez petite de la source. Il est donc naturel d'avoir recours à l'*interférence* des ondes électriques : en supposant que nous connaissions la *durée* des oscillations, il suffit de mesurer la *longueur de l'onde*, pour trouver la vitesse de la propagation.

Mais quelles sont les dimensions de cette longueur d'onde ?

Les oscillations mécaniques que nous pouvons produire ont quelques centaines ou, au plus, quelques milliers de périodes par seconde. Tels sont les courants alternatifs de la bobine de Ruhmkorff, du téléphone. Si les oscillations électriques sont à l'unisson avec les oscillations mécaniques, la longueur de l'onde électrique doit être immense ; c'est ainsi que pour 1000 oscillations par seconde elle sera de 300 kilomètres.

Il est donc évident qu'il faut disposer d'oscillations plus rapides, de plusieurs millions par seconde, par exemple, pour que la longueur de l'onde diminue convenablement.

La question semble devenir insoluble. Cependant, elle ne l'est pas.

Les oscillations électriques peuvent avoir lieu sans l'intervention des oscillations mécaniques.

Henry supposait déjà en 1842, que la décharge d'une bouteille de Leyde a un caractère « oscillatoire ». Cette hypothèse fut confirmée par les recherches théoriques de Thomson et par l'analyse optique de l'étincelle de décharge (Feddersen). Ces oscillations sont suffisamment rapides pour notre but.

La durée de ces oscillations est d'autant plus petite que la « capacité » du conducteur et son coefficient de « self-induction » sont plus petits.

On sait que chaque corps a un *son propre*, c'est-à-dire qu'il peut émettre des notes d'une certaine hauteur. Tout conducteur a, également, un « son électrique », pour ainsi dire, dont la période dépend de la forme et des dimensions du conducteur.

Hertz utilisa cette circonstance. Pour réaliser des oscillations électriques extrêmement rapides, il relia le circuit secondaire de la bobine de Ruhmkorff à un conducteur de petite capacité et de petite self-induction, un conducteur d'une « note électrique » élevée.

La décharge de ce conducteur, qui se produit sous forme d'une étincelle, a le caractère d'un courant alternatif d'une période incomparablement plus petite que celle de l'interrupteur du circuit primaire.

L'interrupteur ne sert qu'à renouveler de temps en temps les oscillations électriques, comme le coup de l'archet, répété de temps en temps, soutient la vibration d'une corde. Malheureusement, l'interrupteur agit trop lentement, et au lieu d'obtenir une « note électrique » continue, nous n'avons qu'une série de notes extrêmement courtes, avec des intervalles relativement grands.

C'est ainsi qu'on a réussi à produire des oscillations électriques, dont le nombre est de plusieurs centaines et même milliers de millions par seconde ; la longueur de l'onde correspondante est donc de quelques mètres, ou même de quelques fractions de mètre.

Nous avons ainsi créé un « vibreur » électrique, dont nous connaissons à l'avance, la période d'oscillation. Mais une autre difficulté se présente : comment allons-nous recueillir et mettre en évidence la transmission de l'onde électrique à travers l'air ambiant ? Quand l'onde parcourt l'air, elle n'est pas sensible ; il faut la recevoir sur un

(1) HERTZ. *Wied. Annalen*, t. XXXI (1888), XXXIV, XXXVI (1889).

autre conducteur ayant un « son électrique » correspondant, sur un « résonnateur » électrique.

En subissant l'action de l'onde électrique, ce conducteur répètera les oscillations du vibreur, comme un diapason vibre sympathiquement avec avec un autre, s'ils sont tous deux à l'unisson.

En employant, pour résonnateur, un fil métallique de dimensions convenables, avec un intervalle très étroit entre ses extrémités, Hertz y obtient une étincelle tantôt brillante, tantôt à peine visible. A une distance considérable du vibreur (une dizaine de mètres) l'action de l'onde est très faible, l'étincelle ne peut franchir qu'un intervalle très petit, de 1/100 mm. par exemple.

L'étincelle ne dure qu'un millionième de seconde. Et malgré tout, nous voyons cette étincelle : telle est la sensibilité inattendue de notre œil.

Après avoir préparé son vibreur et son résonnateur, Hertz fait la série suivante d'expériences.

Il démontre que son onde électrique se propage dans toutes les directions et peut être suivie jusqu'à une distance de 15 à 20 mètres.

L'onde passe librement à travers un mur (isolant) en pierre ou en bois, comme la lumière passe à travers une lame transparente; mais elle ne pénètre pas dans une feuille métallique, elle en est réfléchi et produit derrière la feuille « une ombre électrique » : l'énergie électrique se propage suivant une ligne droite.

Si nous plaçons le vibreur au foyer d'un grand miroir concave (en fer blanc de 2 mètres de hauteur), nous obtenons un faisceau de rayons électriques parallèles.

En recueillant ces rayons au moyen d'un autre miroir, nous trouvons, dans le foyer de celui-ci, une action plus vive, comme dans l'expérience connue de Pictet avec les rayons de chaleur.

En faisant passer le rayon électrique à travers un grand prisme électro-transparent d'asphalte, de 1,5 m. de hauteur et 1,2 m. de largeur, nous observons que le rayon se réfracte avec le même indice de réfraction, à peu près, qui correspondrait à un rayon lumineux.

Lodge⁽¹⁾ a construit deux énormes lentilles en asphalte (de 1 mètre carré environ de surface, pesant 200 kilogr. chacune), et il a recueilli avec elles les rayons électriques, comme nous concentrons la chaleur du soleil à l'aide d'une lentille.

L'onde électrique est *transversale*, et, par consé-

quent, capable à se polariser (dans le sens *optique* de ce mot). On le vérifie, en inclinant le résonnateur d'un angle plus ou moins grand par rapport au rayon. On peut polariser cette onde, et imiter ainsi tous les effets de la lumière polarisée.

Enfin, les rayons électriques ont la propriété de produire le phénomène de l'interférence, dans les mêmes conditions que les ondes lumineuses et sonores.

En faisant, par exemple, tomber un rayon électrique normalement sur un mur métallique, nous obtenons l'interférence du rayon incident avec le rayon réfléchi sous forme d'une *onde stagnante*; en certains points (nœuds) du rayon, le résonnateur est sans action.

La distance entre deux nœuds nous donne la longueur d'une demi-onde et nous permet, par conséquent, de calculer la vitesse de la propagation de l'onde.

Cette vitesse est, en réalité, égale à celle de la lumière.

En un mot, notre onde ou rayon électrique, présente la plus grande ressemblance avec un rayon ordinaire de chaleur ou de lumière et se transmet, sans aucun doute, par le même milieu.

N'avons-nous ici qu'une *ressemblance*?

N'avons-nous pas plutôt une *identité* de deux phénomènes, une identité à tous les points de vue, à la longueur d'onde près.

Le rayon électrique de M. Hertz a une longueur d'onde relativement très grande; mais n'est-ce pas là la seule et unique chose qui le distingue d'un rayon calorifique, comme un rayon d'un corps faiblement chauffé ne diffère que par sa longueur d'onde des rayons ultra-violetts de l'arc voltaïque?

Quelles sont les actions d'un rayon électrique? Dans un résonnateur il engendre la chaleur et la lumière; il n'y a aucun doute qu'il peut produire également, comme tout courant électrique, une action chimique. Mais telles sont aussi les actions d'un rayon solaire absorbé par un corps.

Une *seule chose* manque au rayon électrique: il ne réagit pas sur la rétine, car il n'existe pas, sans doute, dans la nature (que nous sachions), un œil sensible aux rayons d'une longueur d'onde d'un mètre. Mais les rayons de chaleur ne sont pas, non plus, tous aussi perceptibles que les rayons de lumière.

Il est donc naturel d'admettre que l'onde aux

(¹) *Phil. Mag.* (5^e série), vol. 28 (1889).

oscillations transversales, provoquées par un courant alternatif, et l'onde transversale de l'éther, que nous appelons *lumière*, sont des phénomènes *identiques*, à la longueur d'onde près. Mais alors tout rayon lumineux et calorifique n'est qu'un phénomène électromagnétique, une onde aux oscillations électriques très rapides. Le rayonnement de la chaleur est une transformation de la chaleur en énergie électromagnétique d'un type déterminé. L'œil est un organe qui est sensible aux oscillations électriques de certaines périodes.

En nous exprimant ainsi, avec Maxwell, nous avons l'air de vouloir expliquer les choses simples par des choses plus compliquées. Ne serait-il pas plus simple de réduire la définition du phénomène électromagnétique à la notion plus claire du rayon lumineux? Le mécanisme du rayonnement lumineux et calorifique nous est connu sous une forme bien déterminée. Les perturbations électromagnétiques peuvent, au contraire, revêtir des formes diverses, et entre autres celles d'une onde.

Or, il est impossible de décrire quelque chose de plus général par les mots empruntés à un cas particulier. En essayant de définir l'électromagnétisme comme « une lumière obscure à rayons courts » nous construisons une phrase, très embrouillée et qui n'est pas, d'ailleurs, encore assez générale.

Il faut remarquer, d'un autre côté, que l'ancienne notion de l'onde lumineuse (celle de Fresnel) est trop étroite et n'explique pas les propriétés électromagnétiques de la lumière.

J'ai déjà dit que nous avons le droit d'élargir cette notion, sans en sacrifier les parties essentielles. En disant que la lumière est « une onde aux oscillations transversales et *électriques* » nous faisons cette généralisation.

Il est vrai que nous la faisons aux dépens de la clarté. En remplaçant l'ancienne image mécanique si claire « le mouvement transversal des molécules de l'éther » par ce schéma incomplet « oscillation électrique et transversale de l'éther » nous faisons un pas en arrière dans la théorie de la lumière, — au moins par rapport à la simplicité et à la netteté de l'image.

Mais, en revanche, en faisant cette petite concession, nous introduisons tout de suite toute la théorie de l'énergie rayonnante, comme une partie dans une doctrine plus générale des phé-

nomènes électromagnétiques, c'est-à-dire dans la mécanique générale de l'éther.

Ce n'est pas tout.

Ce changement a déjà été très favorable à la théorie même de la lumière. Quelques questions difficiles et douteuses de l'ancienne théorie trouvent une solution simple lorsqu'on se place au point de vue de la théorie « électromagnétique » de la lumière de Maxwell, malgré la lacune que laisse la nouvelle notion de l'onde lumineuse.

Certainement, cette lacune doit être remplie, et la mécanique de l'électromagnétisme n'est encore qu'une simple ébauche. Tant que nous ne pourrons pas indiquer d'une manière claire ce qui se passe dans chaque cellule de l'éther, tant que nous parlerons seulement « d'une *certaine* perturbation, d'une *certaine* oscillation », en ayant recours, pour plus de précision, au terme symbolique « oscillation *électrique* »; tant que nous ne connaissons pas en détail les courroies et les roues invisibles de cette machine compliquée qui s'appelle « champ électrique » (et ce problème semble désarmer les intelligences les plus puissantes comme W. Thomson), nos connaissances ne seront qu'au premier degré de l'échelle.

Mais même, de cette hauteur, de larges perspectives s'ouvrent déjà à nos yeux.

Nous sommes déjà loin de ce rêve vague de Faraday qui, en se demandant si les radiations ne seraient que de simples vibrations des lignes de force (a high species of vibrations in the lines of force) semble effrayé par sa propre pensée, en avouant que ce n'est qu'« une ombre de spéculation » (shadow of speculation).

Il existe déjà des tentatives de remplir cette lacune, mais nous ne croyons pas qu'elles soient heureuses.

Tel est, par exemple, l'hypothèse de Lodge ⁽¹⁾ qui introduit dans cette nouvelle théorie des phénomènes électriques, l'ancienne hypothèse de Symmer, de deux fluides électriques. Pour Lodge, l'éther est une combinaison de deux matières, de l'électricité positive et négative.

L'électrisation moléculaire du milieu est une décomposition de son éther en une sorte de « ions »; l'énergie électrique, une espèce d'énergie chimique.

⁽¹⁾ LODGE. — *Modern Views of Electricity*, 1889.

Nous ne croyons pas qu'il soit utile de retourner à ces deux « fluides électriques », même sous cette forme renouvelée.

Nous ne croyons pas qu'il soit permis de réduire l'électricité à la chimie. Attendons quelque chose de moins artificiel.

Nous avons négligé encore un point.

Nous avons admis que le rayon électrique de Maxwell et de Hertz est identique au rayon lumineux. Ne pourrait-on pas le démontrer ? Nous aurions cette preuve, si nous pouvions donner à l'onde électrique toutes les propriétés d'une onde lumineuse (en diminuant la période des oscillations du vibreur), si nous pouvions la rendre capable de produire la sensation de la lumière.

En diminuant les dimensions du vibreur, nous nous approchons à ce but, mais pour l'atteindre il faudrait que le vibreur fût composé d'une seule molécule. Ne pouvant pas disposer d'une molécule isolée, nous devons renoncer à une pareille expérience, à l'idée de provoquer sciemment des oscillations pareilles. Nous le faisons involontairement avec chaque étincelle électrique, et, en général, avec chaque source de lumière ; mais nous ne pouvons pas mettre en évidence leur nature électrique.

Encore une question. Le spectre solaire contient-il des rayons aux grandes longueurs d'onde, des rayons de Hertz ? Il est fort probable que oui ; il est probable que le soleil nous envoie des rayons situés au delà de la limite du spectre infra-rouge, qui ne produisent aucune action calorifique sensible, mais qui peuvent agir électromagnétiquement.

Peut-être faudra-t-il expliquer par ces rayons, l'action magnétique du soleil sur la terre. En regardant le soleil entier comme un « conducteur », nous devons lui attribuer une période d'oscillations électriques de 6,6 secondes (la longueur d'onde = 1,900,000 kilomètres).

Nos « tempêtes magnétiques » ne seraient-elles pas des traces des perturbations électromagnétiques considérables du soleil, transmises à la terre au moyen des ondes longues de l'éther ? Quant à « l'électricité atmosphérique », il existe déjà une tentative ingénieuse (Arrhenius) de l'expliquer par les actions actino-électriques des ondes courtes du spectre solaire.

Résumons ce qui précède.

L'énergie électromagnétique qui se trouve au

fond des phénomènes électriques et magnétiques est l'énergie de l'éther qui remplit tout l'espace ; elle dépend de déformations et de mouvements moléculaires de l'éther, dont les détails nous sont encore inconnus.

Le rayon lumineux et calorifique est une des formes de la propagation de cette énergie.

Les oscillations moléculaires d'un corps chauffé provoquent dans l'éther le même phénomène qui se produit, sur une autre échelle de longueurs d'onde, dans tout appareil qui engendre des courants électriques alternatifs.

Nous pouvons, à l'aide d'un rayon solaire, comme source de chaleur, actionner une machine dynamo à courants alternatifs et engendrer un arc voltaïque, et ce « soleil électrique » versera réciproquement une partie de son énergie rayonnante dans l'espace.

Nous pouvons désigner comme cycle électromagnétique, toutes les phases principales de ce cycle qui se présentent toutes sous la forme particulière de la lumière, au sens large de ce mot.

Des faits nouveaux démontrent donc encore une fois l'existence de l'éther et démolissent définitivement la théorie de l'action à distance des forces électromagnétiques.

La mécanique de l'électromagnétisme, y comprises la chaleur et la lumière, est la mécanique de l'éther.

En 1881, dans la séance de clôture du Congrès international des électriciens, à Paris, Dumas a appelé notre siècle « siècle de l'électricité ». Le siècle qui a débuté par la pile de Volta et qui finit par l'introduction de l'électricité dans toutes les sphères de notre vie, a bien mérité ce nom.

Mais j'ai vu dans les paroles de Dumas encore un autre sens ; je l'ai dit au célèbre chimiste.

Le mot mystique « électricité », à côté des triomphes de notre science et de ses applications pratiques, a été pendant trop longtemps un reproche pour nous.

Il est temps de s'en émanciper, d'expliquer ce mot, de l'introduire dans la série des notions précises de la mécanique. Le mot traditionnel peut rester, pourvu qu'il ne soit plus un *asylum ignorantia*, mais une devise claire d'une branche considérable de la mécanique du monde.

La fin du siècle nous approche rapidement de ce but. Le mot « éther » va déjà au secours du mot « électricité » et le remplacera bientôt. La méca-

nique de l'éther, qui est encore loin de la netteté complète, mais qui promet un développement rapide, remplace déjà la vieille théorie des « fluides électriques » et la doctrine plus récente, mais insuffisante, « des forces électromagnétiques ».

La mécanique de l'éther nous réserve-t-elle la solution d'autres problèmes du cosmos, comme l'espèrent déjà les plus impatients, c'est plus problématique.

Mais pour l'« électricité » une nouvelle ère a commencé. Pour cette science immense le xx^e siècle sera le siècle de l'éther.

A. STOLETOW.

QUELQUES APPLICATIONS MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ (1)

Sir Howard Grubb, le célèbre constructeur opticien de Dublin, est parvenu, par un emploi extrêmement ingénieux de l'électricité, à résoudre complètement ce problème, des plus difficiles : imprimer à un gros et pesant télescope un mouvement rigoureusement uniforme et continu, de manière que le croisement de son réticule suive très exactement le mouvement d'une étoile.

La résolution de ce problème s'imposait pour l'application des nouvelles méthodes d'astronomie photographique si brillamment instituées en France par les frères Henri (2), car la moindre variation dans la régularité et la continuité du mouvement du télescope transforme en une tache à contours vagues l'image si nette et si précise des étoiles dont la prise n'est pas instantanée.

Ainsi que le fait remarquer Sir Howard Grubb dans l'intéressant mémoire auquel nous empruntons la description de ses appareils (3), les principaux moyens adoptés en général pour réaliser le mouvement uniforme des télescopes consistent à utiliser l'énergie du moteur, pesanteur, ressort ou électricité, qui actionne l'horloge ou le

mouvement d'horlogerie télescopique, pour les trois travaux suivants :

- (a) vaincre le frottement du mouvement d'horlogerie et de ses accessoires ;
- (b) actionner le télescope ;
- (c) vaincre une résistance croissant très rapidement dès la moindre augmentation de vitesse.

Si l'on rend (c) très grand par rapport à (b), en d'autres termes, si l'on emmagasine dans le mouvement une énergie toujours disponible et très considérable par rapport à la puissance normalement exigée par l'appareil, on peut arriver facilement à imprimer au télescope un mouvement

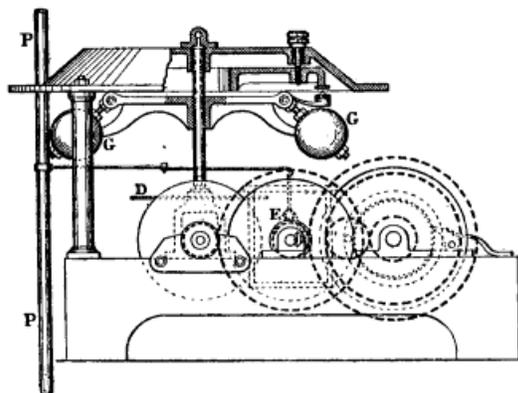


Fig. 1. — Modérateur centrifuge à frottement

presque rigoureusement uniforme pendant de courts intervalles.

Lorsque les travaux (a) et (b) augmentent par exemple, même de très peu, la vitesse diminue, mais en diminuant beaucoup plus le travail (c), d'après l'hypothèse, de sorte que la proportion plus considérable de la puissance totale ainsi reportée sur (a) et (b) ramène très rapidement la vitesse à sa valeur normale.

Les dispositions mécaniques appliquées pour la mise en œuvre de ce principe sont très nombreuses et des plus variées. L'une des plus usitées consiste, (fig. 1), à réaliser (b) par la résistance considérable du frottement développé par le contact, avec un plateau fixe, des appendices de deux boules GG, animées d'une rotation très rapide ; ces appendices viennent frotter sur le plateau dès que la vitesse des boules atteint sa valeur normale, mais avec une pression qui varie comme le carré de leurs vitesses, de sorte que sa résistance,

(1) La Lumière Électrique, 2 novembre 1889.

(2) Annuaire du Bureau des Longitudes, 1890.

(3) Inst. of Mechanical Engineers, juillet 1888.

Annexe n°13 : Table des matières du cours d'électricité professé par Alfred Liénard à l'École des Mines de Saint-Étienne

BIBLIOGRAPHIE

et

OUVRAGES CONSULTÉS POUR LA RÉDACTION DE CE COURS

MAXWELL — *Traité d'Électricité et de Magnétisme*, trad. SELIGMANN-LUI, 2 vol, Gauthiers-Villars 1885-1889.

BRUNHES — *Cours d'Électricité*, Gauthiers-Villars 1895.

ÉRIC GÉRARD — *Leçons sur l'Électricité*, 7e édition, 2 vol., Gauthiers-Villars 1904.

AUBUSSON DE CAVARLAY — *Cours d'Électricité* professé à l'École du Génie Maritime, 2 vol., Challamel 1899.

POTIER — *Cours d'Électricité* professé à l'École des Mines de Paris. [pas d'édition]

JANET — *Leçons d'Électrotechnique générale*, 2 vol., Gauthiers-Villars, 1904.

DACREMONT — *Électricité industrielle*, 2 vol., Dunod 1899.

FISCHER-HINNEN — *Dynamos à courant continu*, Fritsch 1898.

HAWKINS et WALLIS — *La Dynamo*, trad. BOISTEL, 2 vol., Fritsch 1895.

Sylvanus THOMPSON — *Machines dynamo-électriques*, trad. BOISTEL, Baudry 1898.

G. KAPP — *Les machines dynamo-électriques à courant continu et à courants alternatifs*, trad. LECLER, Bérenger 1900. G. KAPP — *Transformateurs à courants alternatifs*,

Baudry 1896.

CHEVRIER — *Pratique industrielle des courants alternatifs*, Carré et Naud 1900.

RODET — *Distribution de l'énergie par courants polyphasés*, 2e édition, Gauthiers-Villars 1903.

BLONDEL — *Moteurs synchrones à courants alternatifs*, Gauthiers-Villars.

RÖSSLER — *Électromoteurs à courant continu et à courants alternatifs*, trad. SAMITCA, 2 vol., Dunod 1903.

GUILBERT — *Les générateurs à l'Exposition de 1900*, Naud 1902.

ARMAGNAT — *Instruments et méthodes de mesures électriques industrielles*, Carré et Naud 1898.

Éric GÉRARD — *Mesures électriques*, Gauthiers-Villars 1896.

MONTPELLIER et ALLIAMET — *Mesures et essais industriels*, Dunod 1904.

LOPPÉ — *Essais industriels des machines électriques*, Gauthiers-Villars 1904.

Notes prises aux cours professés à l'École supérieure d'électricité pendant l'année 1899-1900.

Congrès international d'électricité de 1900, 3 vol., Gauthiers-Villars.

PÉRIODIQUES

Bulletin de la Société internationale des électriciens.

L'éclairage électrique.

L'Électricien.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

Résumé du Cours d'Électricité théorique et Compléments.

CHAPITRE PREMIER. — Introduction. — Conservation de l'énergie. — Unités C. G. S. et pratiques usitées en mécanique.

CHAPITRE II. — Champs de force. — Lignes de force. Tubes de force. Flux. — Champs solénoïdaux. Flux à travers un contour fermé. Les lignes de force d'un champ solénoïdal sont fermées. — Champs dérivant d'un potentiel. — Addition des champs. —

Discontinuités dans les champs de force.

CHAPITRE III. — Électricité statique. — Loi de Coulomb. Principe de la conservation des charges. Unités de charge électrique. — Champ électrique. — Potentiel. — Fonction potentielle d'un système de charges électriques. Théorème de Gauss. — Distribution de l'électricité sur les conducteurs. Condensateurs. Capacité. — Condensateurs plans et cylindriques. — Décharge d'un condensateur.

CHAPITRE IV. — Électricité dynamique. — Piles. Force électromotrice. Courant. Analogie avec la décharge d'un condensateur. Intensité de courant. — Loi de Ohm. Résistance. - Loi de Joule. - Lois de Kirchoff. Courants dérivés .

CHAPITRE V. — Accumulateurs. Capacité. Rendements des accumulateurs. — Accumulateurs au plomb. Électrodes homogènes et hétérogènes. Soins aux accumulateurs. — Accumulateurs fer-nickel d'Édison.

CHAPITRE VI. — Magnétisme. — Loi de Coulomb. — Unités de masse, de force et de flux de force magnétiques. — Expérience de l'aimant brisé. Élément magnétique. Moment magnétique. — Oscillations d'un petit aimant dans un champ magnétique. — Intensité d'aimantation. Distribution fictive équivalente. Force magnétique à l'extérieur et à l'intérieur d'un aimant. Induction. La force magnétique admet un potentiel et l'induction est solénoïdale. — Champs d'un aimant en forme d'anneau et d'un aimant droit.

CHAPITRE VII. — Électromagnétisme. — Loi de Laplace. Loi d'Ampère. Unité électromagnétique d'intensité. — Travail dans le déplacement d'un courant dans un champ magnétique. — Fonction potentielle des actions mutuelles d'aimants et de courants. — Champ magnétique d'un courant. Champs d'un conducteur cylindrique indéfini et d'une bobine droite. — Équations d'un champ magnétique produit à la fois par des aimants et par des courants.

CHAPITRE VIII. — Électrodynamique. — Principe de Hertz sur l'unité de champ magnétique.— Fonction potentielle des actions mutuelles de deux courants ou d'un cou-

rant sur lui-même. Coefficients d'induction mutuelle et de selfinduction. Démonstration des inégalités $L > 0$, $LL' - M^2 > 0$.

Chapitre IX. — Aimantation par influence. — Corps magnétique, et diamagnétiques. Perméabilité. Courbes en H et B. Hystérésis. Perte d'énergie par cycle. Cas d'un champ de direction constante et d'un champ tournant. — Théorie du circuit magnétique. Réluctance. Pertes de flux. Graphique d'Hopkinson. — Réfraction des lignes de force à l'entrefer.

CHAPITRE X. — Phénomènes d'induction. Loi de Lenz. Loi fondamentale — Vérification du principe de la conservation de l'énergie. Cas de un ou de deux courants. — Induction mutuelle et selfinduction de circuits en présence de substances magnétiques. Énergie d'un système d'aimants et de courants. — Démonstration de la loi de la perte d'énergie par hystérésis. — Établissement et extinction d'un courant dans un circuit. Quantité d'électricité induite par une variation de flux. — Distribution des forces électromotrices induites par déplacement. — Selfinduction d'une partie de circuit. Coefficients d'induction mutuelle et de selfinduction de lignes formées de fils parallèles. Selfinduction d'une bobine disposée sur un circuit magnétique. — Courants de Foucault. Expérience d'Arago. Manière de combattre les courants de Foucault.

CHAPITRE XI. — Courants alternatifs. Décomposition en courants alternatifs simples. Fréquence, pulsation, phase. — Représentation d'une fonction alternative simple par un vecteur ou par les imaginaires. Propriétés de ces modes de représentation. — Lois de Kirchhoff pour les courants alternatifs. Réactance. Impédance. — Valeur efficace — Puissance. Courant watté et courant déwatté. — Influence d'un condensateur en série ou en dérivation. Capacité des lignes, effet Ferranti. Condensateurs polariseurs. — Influence des harmoniques. Étouffement des harmoniques. — Influence de l'hystérésis sur le tracé des diagrammes. Courants polyphasés. Montage étoilé ou polygonal. — Puissance des courants polyphasés. — Principe des champs tournants.

CHAPITRE XII. — Tableau des unités électromagnétiques et des formules qui servent à les définir. Examen de diverses modifications proposées.

DEUXIÈME PARTIE

Mesures électriques et magnétiques

CHAPITRE PREMIER - Étalons de résistance, de force électromotrice, de capacité. — Instruments de mesure. Galvanomètre. Galvanomètre Deprez-d'Arsonval. Méthode de Poggendorf pour la mesure des déviations. Shunts. Amortissement des oscillations. Shunt universel. — Galvanomètre balistique. Shuntage du galvanomètre balistique. — Electrodynamomètre. Balance Kelvin — Ampèremètres. — Voltmètres. — Oscillographes. — Wattmètres. Emploi des wattmètres en courants alternatifs. — Compteur d'énergie Elihu-Thomson.

CHAPITRE II. — Méthodes de mesures électriques. — Mesure des résistances. Pont de Wheastone. Mesure de la résistance du galvanomètre ou de la pile. Mesure des faibles résistances et des grandes résistances. — Mesure d'une différence de potentiel, d'une intensité, d'une quantité d'électricité, d'une capacité, des puissances. Puissance des courants alternatifs et polyphasés. Mesure des différences de phase et des coefficients de selfinduction.

CHAPITRE III. — Méthodes et instruments de mesures magnétiques. — Mesure des champs dans les entrefers. — Mesure des perméabilités. Méthodes d'Hopkinson, du tore, de Rowland et d'Ewing, de la force portante, etc. — Mesure de l'hystérésis. Hystérésimètre Blondel.

TROISIÈME PARTIE

Dynamos à courant continu

CHAPITRE PREMIER. — Généralités. Système inducteur et système induit. Dynamo idéale élémentaire. Redressement du courant dans le circuit extérieur. Enroulements en anneau et en tambour. — Machine à induit ouvert. Machines Brush et Thomson-Houston. — Machines unipolaires.

CHAPITRE II. — Génératrices à circuit fermé. — Anneau Gramme. Collecteur. Courbe des potentiels au collecteur. — Enroulements en tambour ondulés et imbriqués.

Induits multipolaires en anneau et en tambour. Enroulements série et série-parallèle. — Force électromotrice, couple résistant et puissance d'une dynamo.

CHAPITRE III. — Réaction d'induit. — Torsion du champ. Ampère-tours transversaux et ampère-tours inverses. — Étincelles aux balais. Calage des balais. — Réduction de la réaction d'induit et du décalage. Pôles supplémentaires. Dispositif Ryan. Comparaison des enroulements en tambour et en anneau.

CHAPITRE IV. — Détails de construction de l'induit. — Noyau d'armature. Bobinage. Collecteur. Balais. — Suppression des courants de Foucault dans les barres de l'induit. Induits à trous et à encoches.

CHAPITRE V. — Système inducteur. Type inférieur, type Manchester, type cuirassé bipolaire ou multipolaire, type Thury. Inducteurs des machines à anneau plat et des machines à disque. — Calcul des ampère-tours inducteurs. Nombre et section des spires inductrices.

CHAPITRE VI. — Excitation des machines dynamo. — Excitation indépendante, série, shunt et compound. Caractéristiques et propriétés de chacune. — Amorçage. — Couplage des dynamos.

CHAPITRE VII. — Moteurs à courant continu. — Caractéristiques mécaniques et propriétés suivant les modes d'excitation et d'alimentation. — Démarrage. — Variations de vitesse. Dispositif Wagner-Couffinhal. — Renversement du sens de rotation. — Freinage.

CHAPITRE VIII. — Essais des dynamos à courant continu. — Essai de fonctionnement. — relevé des caractéristiques. — Essais de rendement. Méthode de la marche en réceptrice à vide, d'Hopkinson et de Potier.

QUATRIÈME PARTIE

Machines à courants alternatifs.

CHAPITRE PREMIER. — Alternateurs monophasés et polyphasés. — Enroulements en anneau et en tambour. Machines à fer tournant. — Forces électromotrices moyenne et efficace d'un alternateur. Facteur de forme. — Couple résistant. Puissance. — Réaction d'induit des alternateurs. Deux manières de tenir compte des effets de selfinduction de l'induit. Analogie entre les effets des courants wattés et déwattés et ceux des ampère-tours transversaux et inverses des dynamos à courant continu. — Cas spécial des alternateurs polyphasés. Champ tournant de réaction d'induit. — Excitation des alternateurs. — Caractéristiques à vide et en court-circuit.

CHAPITRE II. — Couplage des alternateurs. — Impossibilité du couplage en série. — Conditions pratiques du couplage en parallèle. Circuits amortisseurs Leblanc. Indicateurs de phase.

CHAPITRE III. — Moteurs synchrones monophasés et polyphasés. — Diagramme de fonctionnement. Stabilité de marche. Influence des variations de charge et d'excitation. Courbe en V. — Excitation et démarrage des moteurs synchrones.

CHAPITRE IV. — Transformateurs statiques. — Formules fondamentales. Rapport de transformation. Autorégulation. — Types de transformateurs monophasés et polyphasés. Limite de puissance. — Diagramme de fonctionnement avec circuit secondaire non inductif. Influence des variations de charge. — Chute de tension : effets d'un décalage au secondaire et de la dispersion. — Pertes et rendement. Essais des transformateurs. - Autotransformateurs.

CHAPITRE V — Moteurs asynchrones à champ tournant. — Expériences d'Arago et de Ferraris. Glissement. — Dispositifs industriels de production des champs tournants. Champs tournants du stator, du rotor et champ résultant. Formules fondamentales. Comparaison avec les transformateurs et les moteurs à courant continu. — Diagramme de fonctionnement. Analogies avec les transformateurs. — Puissance. Couple moteur aux diverses vitesses. Influence de la dispersion sur le couple de démarrage - Détails de construction. - Dispositifs de démarrage : emploi de résistances dans le rotor, de

moteurs Boucherot, de la mise en marche Hélios. — Renversement du sens de rotation. — Changements de vitesse. Couplage en cascade. — Marche en générateur. Moteurs monophasés asynchrones, — Démarrage. Essais des moteurs asynchrones. Mesure du glissement.

CHAPITRE VI.— Étude générale de la transformation des courants. — Transformation d'un système de courants polyphasés en un autre différent par le nombre de phases. — Transformateurs rotatifs. Convertisseurs. Commutatrices. — Redresseurs ou permutatrices.

CHAPITRE VII. — Étude sommaire des machines à courants alternatifs à collecteur. — Moteurs Gôrges et Heyland. — Moteur-dynamo. Moteur à répulsion.

CHAPITRE VIII. — Compoundage des alternateurs. — Système Hutin et Lublanc. Transformateur de compoundage Boucherot.

CINQUIÈME PARTIE

Distribution et application de l'électricité

CHAPITRE PREMIER. — Systèmes de distribution à deux et plusieurs fils pour courant continu. Dynamos compensatrices. Emploi de batteries tampons. — Distributions à courants alternatifs. Sous-stations de transformation. — Comparaison des courants continu, monophasé et triphasé au point de vue de la perte Joule et de la selfinduction des lignes.

CHAPITRE II. — Canalisations aériennes et souterraines. — Choix de la section. Règle de Thomson. Métaux employés dans les canalisations. — Isolement des lignes. Câbles. Effet Thomson en courants alternatifs. Appareils de sûreté. Coupe-circuits. Disjoncteurs. Parafoudres. — Dérangements des lignes. Indicateurs de terre. Recherche des défauts sur les lignes. Accidents de personnes dus aux distributions électriques. Précautions à prendre. Circulaire ministérielle du 19 août 1895 sur les secours à donner aux personnes foudroyées.

CHAPITRE III. — Éclairage électrique. — Lampes à incandescence. Lampe Nernst. — Lampes à arc à courant continu ou alternatif. Rendement. Régulateurs à potentiel constant, à intensité constante et différentiels. Lampes à globe clos.

CHAPITRE IV. — Traction électrique. — Moteurs employés dans les tramways. Contrôleurs de démarrage et de régulation de vitesse. — Prise de courant. Trolley, archet. — Retour du courant. Éclissage électrique des rails. — Effets des courants vagabonds. — Chemins de fer électriques sur route ou sur voie normale. Exemples divers.

CHAPITRE V. — Emploi de l'électricité dans les mines. — Considérations générales. — Dangers particuliers aux mines à grisou. Moteurs enveloppés. Câbles de sûreté. — Haveuses, pompes, ventilateurs, treuils de mines actionnés à l'électricité. — Traction électrique souterraine. — Lampes électriques portatives à accumulateurs. Lampes Sussmann, Neu-Catrice. Avantages et inconvénients. Installations extérieures : avantages d'une usine centrale de génération d'électricité. — Machines d'extraction électriques à courants continu ou polyphasés. Dispositifs de démarrage et de réglage de vitesse. Comparaison avec les machines à vapeur.

CHAPITRE VI. — Applications de l'électricité en métallurgie. — Appareils de manutention. Qualités à demander aux moteurs. Commande des laminoirs. Fours électrothermiques : fours à arc, à incandescence, à résistance superficielle, à induction. Dispositifs divers.

CHAPITRE VII. — Téléphones.— Appareil de Bell. Récepteur Ader. Microphone Hughes. Disposition d'un poste simple.

Bibliographie et table des matières du cours d'électricité industrielle professé par A. Liénard à l'École des Mines de Saint-Étienne (édition de 1904).

Annexe n°14 : Développements mathématiques dans les articles de Liénard

Sur la pression à l'intérieur des aimants et des diélectriques

La démonstration du lemme revient à écrire le terme $\Delta\Phi\nabla\Phi$ sous la forme d'une divergence de tenseur. Notons $\underline{\underline{A}}$ le tenseur :¹⁵⁴

$$A_{ij} = \partial_i\Phi\partial_j\Phi - \frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2\delta_{ij}$$

On aura donc $\iiint_C \Delta\Phi\nabla\Phi dV = \iiint_C \nabla \cdot (\underline{\underline{A}}) dV$

En utilisant le théorème de Green-Ostrogradsky, on obtient :

$$\iiint_C \nabla \cdot (\underline{\underline{A}}) dV = \oiint_S \underline{\underline{A}} \cdot \mathbf{n} dS$$

Le même raisonnement s'applique pour la fonction Φ' sur l'espace complémentaire à C , avec la condition $\Delta\Phi' = 0$ car la fonction est harmonique. En sommant les deux relations :

$$\iiint_C \Delta\Phi\nabla\Phi d\tau = \oiint_S (\underline{\underline{A}} - \underline{\underline{A'}}) \cdot \mathbf{n} dS$$

On a de plus les relations de passage, en tout point de la surface, dans le cas général :¹⁵⁵

$$\begin{cases} \mathbf{M} \cdot \mathbf{n} = (\nabla\Phi^{int} - \nabla\Phi^{ext}) \cdot \mathbf{n} \\ \nabla \cdot \mathbf{M} = \Delta\Phi^{int} \text{ (équation de Poisson)} \end{cases} \quad (12.27)$$

154. Nous utilisons la convention suivante pour les tenseurs d'ordre 2 : le premier indice désigne la ligne, le second indice la colonne.

155. Jackson 2001, p 210.

La résultante des forces intérieures pour un aimant doit être nulle. En notant \mathbf{M}_1 le moment de l'aimant et Φ_1 son propre potentiel, la formule de Maxwell donne :

$$- \iiint_{C_1} (\mathbf{M}_1 \cdot \nabla)(\nabla\Phi_1) d\tau = 0$$

En intégrant par partie, puis en utilisant le lemme Liénard montre que le terme de gauche de l'expression précédente est égal à :

$$-\frac{1}{2} \iint_S (\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{n}) \mathbf{M}_1 dS$$

qui est en général non nul.

Pour trouver une expression correcte : la résultante des forces s'exerçant sur un corps est égale à la résultante des forces extérieures (puisque celle des forces intérieures est nécessairement nulle). Ces forces peuvent s'exprimer selon la formule de Maxwell :

$$\mathbf{F} = - \iiint_{C_1} (\mathbf{M}_1 \cdot \nabla)(\nabla\Phi_2) dV = - \left(\iiint_{C_1} (\mathbf{M}_1 \cdot \nabla)(\nabla\Phi) dV - \iiint_{C_1} (\mathbf{M}_1 \cdot \nabla)(\nabla\Phi_1) dV \right)$$

Dans l'expression ci-dessus, nous utilisons simplement la linéarité pour faire apparaître un terme dépendant du potentiel total, et un autre qui ne dépend que du potentiel Φ_1 du corps. Or ce dernier terme peut être réécrit sous la forme démontrée plus haut, ce qui amène à la force :

$$\mathbf{F} = - \iiint_{C_1} (\mathbf{M}_1 \cdot \nabla)(\nabla\Phi) d\tau - \frac{1}{2} \iint_S (\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{n}) \mathbf{M}_1 dS$$

À l'intérieur du corps C_1 , l'aimantation s'exprime $\mathbf{M}_1 = \mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{H}$. En remplaçant $-\nabla\Phi_1$ par \mathbf{B} , et en considérant \mathbf{M}_1 constant on obtient :

$$\mathbf{F} = \iiint_{C_1} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{H} dV - \iiint_{C_1} \nabla \left(\frac{\mathbf{H}^2}{2} \right) dV - \frac{1}{2} \iint_S (\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{n}) \mathbf{M}_1 dS \quad (12.28)$$

La théorie de Lorentz, mars 1898.

En ne tenant compte que du déplacement dans l'éther $\epsilon_0 \mathbf{E}$, les équations sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E}) = \rho \\ \nabla \cdot (\mu_0 \mathbf{H}) = 0 \\ \nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{j}_1 + \frac{\partial \epsilon_0 \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \wedge \mathbf{E} = -\frac{\partial \mu_0 \mathbf{H}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (12.29)$$

Dans le cas d'un milieu en mouvement, il faut rajouter dans l'équation des courants un terme de convection $\rho \mathbf{v}_e$ qui correspond au mouvement d'ensemble de la matière (par opposition à \mathbf{j}_1 qui est un mouvement des particules par rapport au milieu) :

$$\nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{j}_1 + \rho \mathbf{v}_e + \frac{\partial \epsilon_0 \mathbf{E}}{\partial t}$$

En considérant une polarisation \mathbf{P} qui est attachée à la matière, le déplacement à l'instant t à travers une surface dS est $\mathbf{P} \cdot d\mathbf{S}$. Pendant le temps dt , la polarisation va varier de :

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + (\mathbf{v}_e \cdot \nabla) \mathbf{P} = \mathbf{j}_p$$

Si la vitesse est indépendante des coordonnées (constante et homogène), l'élément $d\mathbf{S}$ ne varie pas au cours du temps.

Dans le cas du déplacement dans l'éther le vecteur $\epsilon_0 \mathbf{E}$ ne dépend que de la position de l'éther, le courant ne tient donc pas compte de la dérivée temporelle attachée aux axes, ni de la déformation de l'élément de surface.

Ajoutons le courant de polarisation \mathbf{j}_p et remplaçons ρ par $\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}$. En utilisant la relation $-(\nabla \cdot \mathbf{P}) \mathbf{v}_e + (\mathbf{v}_e \cdot \nabla) \mathbf{P} = \nabla \wedge (\mathbf{P} \wedge \mathbf{v}_e)$ dans l'équation des courants on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E}) = \rho - \nabla \cdot \mathbf{P} \\ \nabla \cdot (\mu_0 \mathbf{H}) = 0 \\ \nabla \wedge \mathbf{H} = \mathbf{j}_1 + \rho \mathbf{v}_e + \frac{\partial \epsilon_0 \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \nabla \wedge (\mathbf{P} \wedge \mathbf{v}_e) \\ \nabla \wedge \mathbf{E} = -\frac{\partial \mu_0 \mathbf{H}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (12.30)$$

Note : dans son article, Liénard prend en compte la variation de l'élément de surface dS à travers lequel le flux de \mathbf{P} est calculé, ce qui revient à effectuer une dérivée convective. Au premier ordre :

$$d\mathbf{S}(t + dt) = d\mathbf{S}(t) + \nabla \cdot \mathbf{v}_e dt d\mathbf{S} + (\nabla \wedge \mathbf{v}_e) dt d\mathbf{S} - (d\mathbf{S} \cdot \nabla) \mathbf{v}_e dt$$

ce qui donne pour le courant de polarisation l'expression $\mathbf{j}_p = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{P}) \mathbf{v}_e + \nabla \wedge (\mathbf{P} \wedge \mathbf{v}_e)$. Il considère dans un second temps la vitesse constante et homogène, ce qui revient au même résultat.

Pour un diélectrique au repos, on retrouve dans les équations 12.30 le vecteur $\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ qui correspond au déplacement électrique de Maxwell.

Prenons maintenant $\rho = 0$ et $\mathbf{j}_1 = \mathbf{0}$. Dans le cas d'un diélectrique en mouvement, pour écrire les équations dans le référentiel attaché au diélectrique il faut changer la dérivée $\frac{\partial}{\partial t}$ par $\left(\frac{d}{dt} - \mathbf{v}_e \cdot \nabla\right)$. Pour obtenir l'équation de propagation sur $\epsilon_0 \mathbf{E}$, on applique cette dérivée $\left(\frac{d}{dt} - \mathbf{v}_e \cdot \nabla\right)$ à l'équation des courants dans 12.30. De même, on applique la dérivée à l'équation $\nabla \wedge \mathbf{E} = -\partial \mu_0 \mathbf{H} / \partial t$ pour obtenir l'équation sur \mathbf{H} .

On pose $\hat{\rho} = -\nabla \cdot \mathbf{P}$, qui correspond à la densité de charges liées, et $c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$ la vitesse de l'onde dans le vide. L'opérateur \square est le d'Alembertien dans un référentiel en mouvement $\Delta - \frac{1}{c^2} \left(\frac{d}{dt} - \mathbf{v}_e \cdot \nabla\right)^2$.

On obtient :

$$\square \epsilon_0 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \left[\frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2} - (\mathbf{v}_e \cdot \nabla) \frac{d\mathbf{P}}{dt} + \frac{d\hat{\rho}}{dt} \mathbf{v}_e - (\mathbf{v}_e \cdot \nabla) \hat{\rho} \mathbf{v}_e \right] + \nabla \hat{\rho}$$

et

$$\square \mathbf{H} = -(\nabla \hat{\rho}) \wedge \mathbf{v}_e - \frac{d}{dt} \nabla \wedge \mathbf{P}$$

Concernant le lien entre polarisation et force électrique, Liénard par de l'hypothèse suivante : à l'équilibre, la polarisation est proportionnelle au déplacement dans l'éther, soit $\mathbf{P} = \chi_e \epsilon_0 \mathbf{E}$; par conséquent, tant que le corps n'est pas à l'équilibre, la force qui s'applique sur un moment dipolaire est égale à $\chi_e \epsilon_0 \mathbf{E} - \mathbf{P}$. Cette force s'applique sur une particule électrique, de masse m et de charge e , donc le déplacement est $\boldsymbol{\delta}$. En moyenne, $\mathbf{P} = e \boldsymbol{\delta}$, d'où en utilisant le théorème de la résultante cinétique :

$$\chi_e \epsilon_0 \mathbf{E} - \mathbf{P} = \frac{m}{e} \frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2}$$

Dans un référentiel en mouvement, Liénard montre que la force électrique n'est plus simplement \mathbf{E} . Pour cela, il part de la loi de l'induction, qui donne le lien entre circulation de la force électrique et flux d'induction magnétique :

$$\oint_C \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt}$$

où ϕ est le flux de \mathbf{B} à travers la surface considérée. La dérivée totale de ϕ s'exprime :

$$-\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\partial\phi}{\partial t} + \oint_C (\mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l}$$

D'autre part, on sait d'après le théorème de Stokes que

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} = \iint (\nabla \wedge \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{S} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

D'où $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}$ la force électrique à considérer dans un diélectrique en mouvement. L'équation sur la polarisation devient alors :

$$\chi_e \epsilon_0 (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}) = \mathbf{P} + \frac{m}{e} \frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2}$$

Pour obtenir l'équation de propagation sur \mathbf{P} , il suffit d'appliquer l'opérateur \square à cette dernière, et d'injecter les expressions de $\square \epsilon_0 \mathbf{E}$ et $\square \mathbf{H}$. On obtient

$$\frac{1}{\chi_e} \left(1 + \tau^2 \frac{d^2}{dt^2} \right) \square \mathbf{P} = \left(1 - \frac{v_e^2}{c^2} \right) \nabla \hat{\rho} + \frac{1}{c^2} \left[\frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2} + \frac{d\hat{\rho}}{dt} \mathbf{v}_e - \nabla \left(\mathbf{v}_e \cdot \frac{d\mathbf{P}}{dt} \right) \right] \quad (12.31)$$

La relation de dispersion peut s'établir en utilisant le formalisme complexe, avec une expression de la forme $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}$. Lorsque la propagation de l'onde est dans la même direction que la vitesse du diélectrique on trouve aisément :

$$\frac{1}{\chi_e} (1 - \tau^2 \omega^2) \left[-k^2 - \frac{1}{c^2} (i\omega + v_e i k)^2 \right] = -\frac{\omega^2}{c^2} \quad (12.32)$$

La vitesse de phase, que Liénard considère comme la vitesse de l'onde, est

$$\frac{\omega}{k} = c \sqrt{\frac{1 - (\tau\omega)^2}{\epsilon_r - (\tau\omega)^2}}$$

La vitesse de groupe a une expression plus complexe :

$$\frac{d\omega}{dk} = c \frac{\sqrt{\epsilon_r - (\tau\omega)^2} (1 - (\tau\omega)^2)^{3/2}}{\epsilon_r - 3(\tau\omega)^2 + 2(\tau\omega)^4}$$

Si on considère la force \mathbf{E} et non \mathbf{E}' , l'équation de dispersion obtenue est

$$\frac{1}{\chi_e} (1 - \tau^2 \omega^2) \left[-k^2 - \frac{1}{c^2} (i\omega + v_e i k)^2 \right] = -\frac{1}{c^2} [\omega^2 + v_e k \omega]$$

Le terme supplémentaire $v_e k \omega$ dans le second membre entraîne un facteur 1/2 dans la vitesse d'entraînement de l'onde.

Pour le principe de réaction, l'expression de la force exercée par unité de volume est :

$$\mathbf{F} = (\rho - \nabla \cdot \mathbf{P})(\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}) + (\mathbf{j}_1 + \mathbf{j}_{pol}) \wedge \mathbf{B}$$

En utilisant les équations du champ, on peut remplacer $(\rho - \nabla \cdot \mathbf{P})$ par $\nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E}$ et $(\rho - \nabla \cdot \mathbf{P})\mathbf{v}_e + \mathbf{j}_1 + \mathbf{j}_{pol}$ par $\nabla \wedge \mathbf{H} - \frac{\partial \epsilon_0 \mathbf{E}}{\partial t}$. En ajoutant et soustrayant le terme $\epsilon_0 \mathbf{E} \wedge \frac{\partial \mu_0 \mathbf{H}}{\partial t}$ on obtient

$$\mathbf{F} = (\nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E})\mathbf{E} + (\nabla \wedge \mathbf{E})\epsilon_0 \mathbf{E} + (\nabla \wedge \mathbf{H})\mu_0 \mathbf{H} - \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_0 \mathbf{E} \wedge \mu_0 \mathbf{H})$$

En utilisant la relation $(\nabla \wedge \mathbf{A}) \wedge \mathbf{A} = \nabla(\mathbf{A}^2/2) - (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{A}$ on fait apparaître les pressions électrique et magnétique de Maxwell :

$$\mathbf{F} = \nabla \left(\frac{\mu_0 \mathbf{H}^2}{2} \right) - (\mu_0 \mathbf{H} \cdot \nabla)\mathbf{H} + (\nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E})\mathbf{E} + \nabla \left(\frac{\epsilon_0 \mathbf{E}^2}{2} \right) - (\epsilon_0 \mathbf{E} \cdot \nabla)\mathbf{E} - \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_0 \mathbf{E} \wedge \mu_0 \mathbf{H})$$

En intégrant sur tout l'espace, les termes impliquant des opérateurs différentiels s'annulent (\mathbf{E} et \mathbf{H} sont nuls à l'infini). Il reste le terme $-\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_0 \mathbf{E} \wedge \mu_0 \mathbf{H})$.

La théorie de Lorentz et celle de Larmor, août 1898.

Les opérateurs différentiels au repos et en mouvement sont différenciés par les indices R et R' . L'équation de la charge au repos donne

$$\rho = \nabla_R \cdot \epsilon_0 \mathbf{E}$$

Pour un mouvement à vitesse constante, l'opérateur $\nabla \cdot$ se transforme :

$$\nabla_{R'} \cdot = \nabla_R \cdot - \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt'} \mathbf{v}_e \cdot$$

$$\text{où } \frac{d}{dt'} = \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v}_e \cdot \nabla)$$

L'expression de la charge dans le cas d'un corps en mouvement se retrouve ainsi :

$$\rho' = \nabla_{R'} \cdot \epsilon_0 \mathbf{E}' = \nabla_{\mathbf{R}} \cdot \epsilon_0 \mathbf{E}' + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_e \cdot \frac{d\epsilon_0 \mathbf{E}}{dt'}$$

Au premier ordre, et en utilisant l'expression de \mathbf{E}' ainsi que la relation $\nabla_{\mathbf{R}} \wedge \mathbf{B} = \mathbf{j} + \frac{\partial \epsilon_0 \mathbf{E}}{\partial t}$ on obtient

$$\rho' = \rho - \frac{\mathbf{j} \mathbf{v}_e}{c^2} \cdot \mathbf{E}$$

Si les charges se déplacent à la vitesse \mathbf{v} , on aura un courant de conduction $\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}$.

Annexe n°15 : Établissement de l'expression des potentiels de Liénard et des champs dérivés

Détermination des potentiels

La démonstration usuelle pour les potentiels de Liénard-Wiechert sans utiliser le formalisme de la relativité est la suivante :

La formule des potentiels retardés donne l'action d'une charge en un point $P(\mathbf{r}, t)$. Étant donné le temps de propagation de la perturbation, il faut considérer la charge en un instant antérieur t' et dans une position \mathbf{r}' telle que $t = t' + \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{c}$. En sommant toutes les contributions, on obtient :

$$\begin{cases} \Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho\left(\mathbf{r}', t - \frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|}{c}\right)}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|} dV \\ \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{\mathbf{j}\left(\mathbf{r}', t - \frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|}{c}\right)}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|} dV \end{cases} \quad (12.33)$$

Dans le cas d'une charge ponctuelle, les fonctions ρ et \mathbf{j} se réduisent à :

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{r}', t') = q\delta(\mathbf{r} - \mathbf{x}(t')) \\ \mathbf{j}(\mathbf{r}', t') = q\mathbf{v}(t')\delta(\mathbf{r} - \mathbf{x}(t')) \end{cases} \quad (12.34)$$

où $\mathbf{x}(t')$ est la trajectoire de la particule et $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt'}$ sa vitesse.

En utilisant ces expressions dans la formule des potentiels retardés, on obtient : ¹⁵⁶

156. Les bornes de l'intégrale sont déduites en utilisant la condition $t' \leq t$ ou en ajoutant une fonction de causalité nulle pour $t - t' < 0$.

$$\begin{cases} \Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^t \frac{1}{\|\mathbf{r} - \mathbf{x}(t')\|} \delta\left(t - t' - \frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{x}(t')\|}{c}\right) dt' \\ \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0 q}{4\pi} \int_{-\infty}^t \frac{\mathbf{v}(t')}{\|\mathbf{r} - \mathbf{x}(t')\|} \delta\left(t - t' - \frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{x}(t')\|}{c}\right) dt' \end{cases} \quad (12.35)$$

Posons

$$\begin{cases} \mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{x}(t') \\ \mathbf{n} = \mathbf{R}/R \end{cases}$$

Pour la résolution on peut introduire la fonction $g(t') = t - t' - \frac{\|\mathbf{R}(t')\|}{c}$. En utilisant les propriétés de la fonction δ et en supposant qu'il y ait une unique valeur t'_0 telle que $g(t'_0) = 0$ on aura :¹⁵⁷

$$\delta(g(t')) = \frac{\delta(t' - t'_0)}{|g'(t'_0)|}$$

La valeur de $g'(t'_0)$ s'obtient en différentiant la quantité \mathbf{R}^2 , ce qui donne

$$|g'(t'_0)| = 1 - \mathbf{n} \cdot \frac{\mathbf{v}}{c}$$

En réinjectant cette expression dans l'intégrale, on obtient :

$$\begin{cases} \Phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left[R - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{R}}{c}\right]_{ret}} \\ \mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{q\mathbf{v}}{R - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{R}}{c}} \right]_{ret} \end{cases} \quad (12.36)$$

Dans ces expressions, l'indice *ret* signifie que ces quantités doivent être prises au temps retardé t'_0

Calculs des champs associés

Reprenons l'expression des potentiels Φ et \mathbf{A} ci-dessus (équation 12.36). L'instant retardé est noté plus généralement t' .

¹⁵⁷. L'unicité de la solution de l'équation $g(t'_0) = 0$ se démontre aisément en relativité par le moyen du cône de lumière du point considéré

Posons pour simplifier $e = \frac{q}{4\pi\epsilon_0}$ et la longueur $L = R - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{R}}{c}$. Les potentiels s'écrivent alors :

$$\begin{cases} \Phi = \frac{e}{L} \\ \mathbf{A} = \frac{e\mathbf{v}}{c^2L} \end{cases}$$

Les champs électriques et magnétiques associés sont définis comme :

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \Phi$$

$$\mathbf{B} = \nabla \wedge \mathbf{A}$$

Dans le calcul des champs, les dérivations se font par rapport aux grandeurs x, y, z, t dont les potentiels ne dépendent pas explicitement. Pour calculer les dérivées partielles, introduisons quelques relations :¹⁵⁸

En dérivant l'identité $R^2 = \mathbf{R}^2$ par rapport à t' on tire $\frac{\partial R}{\partial t'} = -\frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{v}}{R}$ (la vitesse \mathbf{v} est égale à $-\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial t'}$ car \mathbf{R} est orienté de la particule vers le point considéré). Donc $\frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{v}}{R} \frac{\partial t'}{\partial t}$

D'autre part, $R(t') = c(t - t')$. On en déduit :

$$\frac{\partial t'}{\partial t} = \frac{1}{1 - \frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{v}}{Rc}} = \frac{R}{L} \quad (12.37)$$

De la même façon, en dérivant par rapport aux coordonnées d'espace :

$$\nabla t' = -\frac{1}{c} \nabla R = -\frac{1}{c} \left(\frac{\partial R}{\partial t'} \nabla t' + \frac{\mathbf{R}}{R} \right)$$

d'où :

$$\nabla t' = -\frac{\mathbf{R}}{cL} \quad (12.38)$$

Calculons les dérivées de la grandeur L :

158. Les relations entre les opérateurs de dérivation sont tirés de Landau et Lifshitz 1980, p. 175-6.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\partial t'}{\partial t} \left(\frac{\partial R}{\partial t'} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{v} \cdot \mathbf{R}}{\partial t'} \right) = c \frac{\partial t'}{\partial t} \left(-\frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{v}}{Rc} - \frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{a}}{c^2} + \frac{v^2}{c^2} \right) \\ \nabla L = \frac{\partial L}{\partial t'} \nabla t' + \left(\frac{\mathbf{R}}{R} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \end{array} \right.$$

où \mathbf{a} est l'accélération de la particule, $\mathbf{a} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t'}$. En remplaçant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial t} = \frac{Rc}{L} \left(\frac{L}{R} - 1 - \frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{a}}{c^2} + \frac{v^2}{c^2} \right) \\ \nabla L = -\frac{1}{c} \frac{\partial L}{\partial t} \frac{\mathbf{R}}{R} + \left(\frac{\mathbf{R}}{R} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \end{array} \right. \quad (12.39)$$

Nous disposons de toutes les expressions nécessaires au calcul des champs. Commençons par le champ électrique \mathbf{E} .

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} &= \frac{e}{c^2} \left[\frac{1}{L} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} - \frac{1}{L^2} \mathbf{v} \frac{\partial L}{\partial t} \right] \\ \Leftrightarrow \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} &= \frac{e}{L^2} \left[1 - \frac{L}{R} - \frac{v^2}{c^2} \right] \frac{R \mathbf{v}}{L c} + \frac{e}{c^2 L^2} \left[R \mathbf{a} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{R} \frac{R \mathbf{v}}{L c} \right] \end{aligned}$$

Dans l'expression ci-dessus les termes ont été regroupés selon leur comportement pour R qui tend vers l'infini. Le premier crochet se comporte en $1/R^2$, le second en $1/R$ (rappelons que $L \propto R$).

Faisons la même chose pour le terme dû au potentiel électrostatique :

$$\begin{aligned} \nabla \Phi &= e \nabla \left(\frac{1}{L} \right) \\ \Leftrightarrow \nabla \Phi &= -\frac{e}{L^2} \nabla L \\ \Leftrightarrow \nabla \Phi &= \frac{e}{L^2} \left[\frac{v^2}{c^2} + \frac{L}{R} - 1 \right] \frac{\mathbf{R}}{L} - \frac{e}{L^2} \left(\frac{\mathbf{R}}{R} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) - \frac{e}{L^2} \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{R} \mathbf{R}}{c^2 L} \\ \Leftrightarrow \nabla \Phi &= \frac{e}{L^2} \left[\left(\frac{v^2}{c^2} - 1 \right) \frac{\mathbf{R}}{L} + \frac{\mathbf{v}}{c} \right] - \frac{e}{L^2} \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{R} \mathbf{R}}{c^2 L} \end{aligned}$$

Regroupons les deux expressions :

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \Phi \quad (12.40)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{E} = \frac{e}{L^3} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \left(\mathbf{R} - R\frac{\mathbf{v}}{c}\right) + \frac{e}{L^3 c^2} \left[(\mathbf{a} \cdot \mathbf{R}) \left(\mathbf{R} - R\frac{\mathbf{v}}{c}\right) - RL\mathbf{a}\right] \quad (12.41)$$

En reprenant l'expression de L , on trouve que $RL = \mathbf{R} \cdot \left(\mathbf{R} - R\frac{\mathbf{v}}{c}\right)$. On peut mettre le second terme sous la forme d'un double produit vectoriel¹⁵⁹

$$\mathbf{E} = \frac{e}{L^3} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \left(\mathbf{R} - R\frac{\mathbf{v}}{c}\right) + \frac{e}{L^3 c^2} \mathbf{R} \wedge \left[\left(\mathbf{R} - R\frac{\mathbf{v}}{c}\right) \wedge \mathbf{a}\right]$$

Remplaçons e et L par leurs valeurs respectives et posons $\mathbf{n} = \mathbf{R}/R$. On arrive à :

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \frac{1 - v^2/c^2}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}/c)^3} \left(\mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c}\right) + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R c^2} \frac{1}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}/c)^3} \mathbf{n} \wedge \left[\left(\mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c}\right) \wedge \mathbf{a}\right] \quad (12.42)$$

Le premier terme, proportionnel à $1/R^2$ est dominant en champ proche. Il correspond aux actions électrostatiques. Le second terme, proportionnel à $1/R$ est le terme de champ lointain correspondant aux actions électromagnétiques.

Pour calculer le champ magnétique \mathbf{B} , utilisons la définition à partir du potentiel vecteur : $\mathbf{B} = \nabla \wedge \mathbf{A}$.

Calculons les deux quantités suivantes :

$$\begin{aligned} \nabla L \wedge \mathbf{v} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial L}{\partial t} \frac{\mathbf{R}}{R} \wedge \mathbf{v} + \frac{\mathbf{R}}{R} \wedge \mathbf{v} \\ \Leftrightarrow \nabla L \wedge \mathbf{v} &= \frac{\mathbf{R}}{R} \wedge \mathbf{v} \left[1 + \frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{a}}{c^2} - \frac{v^2}{c^2}\right] \frac{R}{L} \end{aligned}$$

et comme la vitesse ne dépend explicitement que de t' , on a

$$\nabla \wedge \mathbf{v} = \frac{1}{cL} \mathbf{a} \wedge \mathbf{R}$$

Exprimons maintenant le champ magnétique \mathbf{B} :¹⁶⁰

159. Pour trois vecteurs $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ on a : $\mathbf{a} \wedge (\mathbf{b} \wedge \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c}$

160. On utilise l'identité : $\nabla \wedge (a\mathbf{A}) = \nabla a \wedge \mathbf{A} + a\nabla \wedge \mathbf{A}$.

$$\begin{aligned}
\mathbf{B} &= \nabla \wedge \mathbf{A} \\
\Leftrightarrow \mathbf{B} &= \frac{e}{c^2} \nabla \wedge \frac{\mathbf{v}}{L} \\
\Leftrightarrow \mathbf{B} &= \frac{e}{L^2 c^2} [-\nabla L \wedge \mathbf{v} + L \nabla \wedge \mathbf{v}] \\
\Leftrightarrow \mathbf{B} &= -\frac{e}{L^2 c^2} \mathbf{n} \wedge \left[\left(1 + \frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{a}}{c^2} - \frac{v^2}{c^2} \right) \frac{R}{L} \mathbf{v} + \frac{R}{c} \mathbf{a} \right]
\end{aligned}$$

où $\mathbf{n} = \mathbf{R}/R$ le vecteur déjà introduit plus haut.

En reprenant l'expression de \mathbf{E} (équation 12.41), on remarque que $\mathbf{B} = \frac{1}{c} \mathbf{n} \wedge \mathbf{E}$. L'onde émise par la particule a donc localement une structure d'onde plane.

Bibliographie

Abréviations utilisées :

- *LE : La Lumière Électrique*
- *EE : L'Éclairage Électrique*
- *CRAS : Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*
- *PM : Philosophical Magazine*
- *The Elec : The Electrician*
- *PRS : Proceedings of Royal Society of London*
- *RGSPA : Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées*
- *AN : Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*
- *Phil. Trans. RS : Philosophical Transactions of the Royal Society*

Pour des raisons de lisibilité, les sources primaires sont séparées entre les auteurs individuels d'une part, et les institutions d'autre part. Cette deuxième catégorie regroupe également les journaux et les articles dont l'auteur n'est pas clairement identifié (éditorial, préface, ...).

Pour certaines entrées (documents d'écoles notamment) la date n'est pas clairement mentionnée. Pour les besoins du renvoi bibliographique nous attribuons une date, et ajoutons la mention « date non référencée ».

Une mention signale lorsque le document est disponible sur le site de la Bibliothèque Nationale de France (Gallica) ou sur le site d'une autre institution officielle.

Bibliographie primaire :

Auteurs

Aguillon, Louis

1889. *L'École des Mines de Paris : Notice historique*. Paris : Charles Dunod.

Allard, Émile ; Joubert, Jules ; Le Blanc, Félix ; Potier, Alfred et Tresca, Henri

1882. « Résultats des expériences faites à l'exposition d'électricité sur les machines et les régulateurs à courants alternatifs », *LE*, vol. VII, pp. 483-7.

1883. *Résultats des expériences faites à l'exposition d'électricité sur les machines et les régulateurs à courants alternatifs*. Paris : Gauthiers-Villars, 1883.

Aubusson de Cavarlay, Henri

1894. *Cours d'électricité professé à l'école d'application du génie maritime pour l'année 1894-1895*.

Bâclé, Louis

1912. « Nécrologie de Gustave Richard, par M. Bâclé », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*.

Becquerel, Henri

1885. « Mesures du pouvoir rotatoire magnétique des corps en unités absolues », *LE*, vol. XVIII, p. 122-33.

1896. *Cours de physique à l'école polytechnique, 2^e division*, année 1896-1897. École Polytechnique.

1897. *Cours de physique à l'école polytechnique, 1^{ère} division*, année 1897-1898. École Polytechnique.

Berger, Georges

1884. « Assemblée générale du 5 novembre 1884 », *Bul. SIE*, vol. I, p. 364.

Blondel, André

1902. *Cours d'électricité à l'École Nationale des Ponts et Chaussées*.

Blondel, André (éd)

1912. *Mémoires sur l'électricité et l'optique par A. Potier*. Paris : Gauthiers-Villars.

Blondin, Jules

1891 (a). « Propagation des perturbations électriques dans les fils conducteurs », *LE*, vol. XLI, pp. 101-9.

1891 (b). « Sur la théorie de l'électrodynamique, d'après M. J. Larmor », *LE*, vol. XLII, pp. 515-24.

1893. « Sur les oscillations électriques dans un conducteur cylindrique », *LE*, vol. L, pp. 301-6 ; 408-18 ; 469-73 ; 505-10 ; 568-75.

1894 (a). « Sur la propagation de l'électricité dans les conducteurs », *LE*, vol. LI, pp. 401-6.

1894 (b). « La théorie dynamique de l'éther électrique et lumineux », *LE*, vol. LII, pp. 351-60.

1894 (c). « Sur les tourbillons électrodynamiques », *LE*, vol. LII, pp. 405-16 ; 570-7 ; 608-14.

1894 (d). « Sur la propagation des perturbations électriques et magnétiques », *EE*, vol. I (1894), pp. 16-22 ; 118-24 et vol. II (1895), pp. 62-70 ; 110-20.

Blondlot, René

1891. « La théorie électromagnétique de la lumière : principes de cette théorie - propagation d'une onde plane », *RGSPA*, vol. II, pp. 289-95.

Bourdin, Jules

1885. « Lettre à M. Clausius », *LE*, vol. XVI, pp. 419-423.

Bouty, Edmond

1886. « Note sur la grandeur des tourbillons moléculaires de Maxwell et sur la densité de l'éther lumineux », *JdP*, vol. V, 2e série, p. 547.

Bréguet, Antoine

1878. « Conférences sur les applications industrielles de l'électricité », Palais du Trocadéro, 8 août 1878.

Brillouin, Marcel

1895. « Bibliographie », *RGSPA*, vol. VI, p. 948. Revue de Brunhes 1895.

Brunhes, Bernard

1891. « Sur la différence entre l'électrodynamique de Helmholtz et celle de Maxwell », *LE*, vol. XL, pp. 15-24

1894. « Heinrich Hertz et son œuvre », *LE*, vol. LI, pp. 241-6.

1895. *Cours élémentaire d'Électricité*. Paris : Gauthiers-Villars

Burnand, Robert (dir.)

1924. *Qui êtes-vous : annuaire des contemporains - notices biographiques*. Paris : G Ruffy.

Campbell, Lewis et Garnett, William

1882. *Life of James Clerk Maxwell*. Londres : MacMillan.

Challis, James

1878. « Theoretical Explanations of the Actions of the Radiometer, the Otheoscope, and the Telephone ». *PM*. vol. V, n°33 (Juin) : pp. 452-456. <http://www.archive.org/details/londonedinburgh5518781ond>

Chappuis, Louis

1891. *Leçons de physique générale*, 3 volumes. Paris : Gauthiers-Villars.

Clausius, Rudolf

1885. « Sur les rapports entre les grands agents de la nature », *LE*, vol. XVI, pp. 253-9.

Cornu, Alfred

1881. *Cours de physique à l'école polytechnique, 2^e division*, année 1881-1882. École Polytechnique.

1898. *Cours de physique à l'école polytechnique, 1^{re} division*, année 1898-1899. École Polytechnique.

Curie, Pierre

1902. *Notice sur les travaux scientifiques de M. P. Curie*. Paris : Gauthiers-Villars.

Delporte, Eugène

1908. « Les chronographes à l'observatoire », *Bulletin de la Société Belge d'Astronomie*, vol. XIII, pp. 360-8.

Duckett, William (dir.)

1835. *Dictionnaire de la conversation et de la lecture*, vol. XXIII. Londres : Bossange, Barthès and Lowell.

Duhem, Pierre

1914. *La Théorie Physique, son Objet, sa Structure*, deuxième édition. Paris : Librairie Marcel Rivière.

Faraday, Michael

1839. *Experimental researches in electricity*, 3 volumes. Londres : Richard and John Edward Taylor.

Figuier, Louis

1862. *Les merveilles de la science, ou description populaire des inventions modernes*, volumes 1 à 6. Paris : Jouvot et Cie. Date non référencée (dans la préface du volume 1 l'auteur fait référence à un autre ouvrage publié « dix ans plus tôt », en 1852).

FitzGerald, Georges Francis

1885 (a). « On a model illustrating some properties of the ether ». *Nature*, vol. 31, pp. 524-525. <http://www.archive.org/details/nature3118841885lock>

1885 (b). « On the structure of mechanical models illustrating some properties in the ether ». *Nature*, vol. 31, pp. 596-597. <http://www.archive.org/details/nature3118841885lock>

Fizeau, Hippolyte

1851. « Sur les hypothèses relatives a l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur » *CRAS*, vol. XXXIII, pp. 349-355.

Foucault, Léon

1853. « Sur les vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau ». Thèse. Faculté des sciences de Paris. (Version imprimée : Paris : Bachelier).

Foussereau, Georges

1892. « De l'entraînement des ondes lumineuses par la matière en mouvement », *JdP*, vol. I série 3, pp. 144-47 et *Bul. SFP*, numéro du 18 janvier 1895, pp. 26-33.

Fresnel, Augustin

1866. *Œuvres complètes*, 3 volumes. H. de Sénarmont, É. Verdet, L. Fresnel (éds). Paris : Imprimerie impériale.

Gariel, Charles-Marie

1887. *Encyclopédie des travaux publics : Physique*, 2 volumes. Paris : Baudry et Cie.

Géraldy, Franck

1885. « À propos du Traité de J. Clerk-Maxwell », *LE*, vol. XV, p. 13-6. Revue de : Maxwell 1885.

Gérard, Éric

1890. *Leçons sur l'électricité*, vol. 1. Paris : Gauthiers-Villars.

1891. *Leçons sur l'électricité*, 2 volumes, deuxième édition. Paris : Gauthiers-Villars.

Gordon, James E. H.

1881. *Four lectures on static electric induction*. New York : D. Van Nostrand.

Grove, William

1860. « On the transmission of electrolysis across glass », *PM*, vol. 20, n°131.

Guérout, Auguste

1875. *Traité de la teinture des tissus et de l'impression du calicot*. Paris : Eugène Lacroix.

1881. « La réfraction de l'électricité », *LE*, vol. IV, pp. 330-3.

Guillaume, Charles-Édouard

- 1892 (a). « Bibliographie », *RGSPA*, vol. III, pp. 95 ; 382 ; 716-7. Revue de : Duhem, *Leçons d'Électricité et de Magnétisme*. 1891. Paris : Gauthiers-Villars.
- 1892 (b). « Bibliographie », *RGSPA*, vol. III, p. 61. Revue de : Lucas, F. *Traité d'électricité à l'usage des ingénieurs et des constructeurs*. 1892. Paris : Baudry et Cie.
1897. « Bibliographie », *RGSPA*, vol. VIII, p. 33-4. Revue de : Mascart, É, *Leçons sur l'Électricité et le Magnétisme*. deuxième édition. 1897. Paris : Masson et Cie.

Guillaume, Charles-Édouard et Poincaré, Lucien

1900. « Le prochain Congrès international de physique », *RGSPA*, vol. XI, pp. 669-79.

Guillet, Léon

1929. *Cent ans de la vie de l'École Centrale des Arts et Manufactures 1829-1929*. Paris : Éditions artistiques de Paris.

Heaviside, Oliver

1891. « The Rotationnal Ether in its Application to Electro-magnetism », *The Electrician*, vol. XXVI, p. 360.
1892. *Electrical Papers*, 2 volumes. Londres : MacMillian and Co.
<http://www.archive.org/details/electricalpapers01heavuoft>

Heaviside, Oliver et Lodge, Oliver

1892. « The position of 4π in Electromagnetic Units ». *Nature*, numéro du 28 juillet 1892, pp. 292-3.

Hertz, Heinrich

1889. « L'identité de la lumière et de l'électricité », *Bul. SIE*, vol. VI.

- 1890 (a). « Sur les équations fondamentales de l'électrodynamique pour les corps en mouvement », *LE*, vol. XXXVII, p. 137.
- 1890 (b). « Sur les équations fondamentales de l'électrodynamique pour les corps en mouvement », *LE*, vol. XXXVIII, p. 488.
1893. *Electric waves (Researches on the propagation of electric action with finite velocity through space)*. trad. D.E. Jones. pp. 160-171 ; 195-268. Londres : MacMillan and Co.

Hospitalier, Édouard

1885. *La physique moderne : l'électricité dans la maison*. Paris : G. Masson.
1888. « Qu'est-ce que l'électricité », *L'Électricien*, vol. XII, pp. 577-80.
1890. *Traité élémentaire de l'énergie électrique*, vol. I. Paris : G. Masson.

Jamin, Jules

1873. *Cours de physique à l'école polytechnique, 1^{ère} division*, année 1873-1874. École Polytechnique.

Janet, Paul

1887. « La physique mathématique et la physique expérimentale ». *Revue scientifique (Revue rose)*, 3e série, vol. XIV, n°2, pp. 34-8.
1890. *Sur l'aimantation transversale des conducteurs magnétiques*. Paris : Gauthiers-Villars.
- 1893 (a). *Premiers principes d'électricité industrielle*. Paris : Gauthiers-Villars.
- 1893 (b). *Électricité industrielle 2ème année, cours public professé par M. Paul Janet*. Grenoble : Alexandre Gratier et Cie.
1904. *Compte-rendu sur le laboratoire central et l'école supérieure d'électricité*.
1909. *Compte-rendu sur le laboratoire central et l'école supérieure d'électricité*.

Jones, Bence (éd)

1870. *The life and letters of Faraday*, 2 volumes Londres : Longmans, Green, and Co.

Joubert, Jules

1889 (a). « Sur les expériences de Hertz », *Bul. SIE* vol. VI, pp. 318-20.

1889 (b). « Expériences de M. Hertz sur les ondulations électriques », *JdP*, vol. VIII, 2e série, pp. 116-26.

Joubert, Jules et Mascart, Éleuthère

1882. *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, 2 volumes. Paris : Masson.

Langevin, Paul

1905. « Sur l'origine des radiations et l'inertie électromagnétique », *JdP* vol. 4, série 1 XXe siècle, pp.165-183.

Larmor, Joseph

1893. « A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium ». *PRS*. Publié le 1 janv. 1893, vol. 54, pp. 438-461. <http://rspl.royalsocietypublishing.org/>

1895. « A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium. Part II : Theory of Electrons ». *PRS*. Publié le 1 janv. 1895, vol. 58, pp. 222-228. <http://rspl.royalsocietypublishing.org/>

1897. « A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium. Part III : Relations with Material Media ». *PRS*. Publié le 1 janv. 1897, vol. 61, pp. 272-285. <http://rspl.royalsocietypublishing.org/>

1898. « Note on the Complete Scheme of Electrodynamical Equations of a Moving Material Medium, and on Electrostriction ». *PRS*. Publié le 1 janv. 1898, vol. 63, pp. 365-372. <http://rspl.royalsocietypublishing.org/>

Lauth, Charles

1900. *Rapport général sur l'histoire et le fonctionnement de l'École Municipale de Physique et de Chimie Industrielles*. Paris : Imprimerie générale Lahure.

Ledeboer, Pierre-Hugo

1889. « Sur les équations générales du mouvement de l'électricité », *LE*, vol. XXXIII, pp. 157-68, 204-12, 273-6, 417-22, 504-10, 615-21.

Lévy, Albert et Pinet, Gaston

1894. *L'argot de l'X, illustré par les X*. Paris : Émile Testard. Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France.

Liénard, Alfred-Marie

1892. Relevé de notes d'Alfred Liénard à l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Disponible en ligne : <http://www.anales.org/archives/images/n1/lienard-alfred.jpg>. Consulté le 16/08/2020.

1894. « Pressions à l'intérieur des aimants et des diélectriques », *LE*, LII, pp. 7-11 ; 67-73.

1898 (a). « La théorie de Lorentz », *EE*, vol. XIV, pp. 417-24 ; 456-61.

1898 (b). « Champ électrique et magnétique produit par une charge électrique concentrée en un point et animée d'un mouvement quelconque », *EE*, vol. XVI, pp. 5-14 ; 53-9 ; 105-12.

1898 (c). « La théorie de Lorentz et celle de Larmor », *EE*, vol. XVI, pp. 320-34 ; 360-5.

1899. « Au sujet d'une note de M. Pellat sur la polarisation des diélectriques », *CRAS*, vol. CXXVIII, p. 1568. Voir aussi *EE*, vol. XX, p. 465.

1900. Lettre du 6 février 1900, Liénard au Général commandant l'école. École Polytechnique, dossier d'Alfred Liénard.

1902. « Sur l'application des équations de Lagrange aux phénomènes électrodynamiques et électromagnétiques » *CRAS*, vol. CXXXIV, p. 163. Voir aussi *EE*, vol. XXX, p. 185.

1904. *Cours d'électricité industrielle à l'École des Mines de Saint-Étienne*. Saint-Étienne : Société de l'imprimerie Théolier, J. Thomas et Cie.

1908. Dossier de l'enseignant Alfred Liénard. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Lodge, Oliver

1892. « On the present state of our knowledge on the connection between ether and matter : an historical summary », *Nature*, vol. XLVI, numéro du 16 juin 1892, pp. 164-5.

1894. « Theoretical Explanations of the Actions of the Eadiometer, the Otheoscope, and the Telephone ». *Sixty-third Meeting of the British Association for the Advancement of Science held at Nottingham in September 1893*. Londres : John Murray. p. 688. <http://www.archive.org/details/reportofbritisha94brit>

Lorentz, Hendrik Antoon

1892. « La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants ». *AN*. vol. XXV, pp. 363-552.

1895. *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Ersclzeinungen in bewegten Körpern*. Leiden : E. J. Brill.

1897. « Opmerkingen naar aanleiding van bovenstaarde mededeeling », *Koninklijke Akademie van Wetenschappen*. Amsterdam

1937. *Collected Papers*. Dordrecht : Springer

Malus, Étienne-Louis

1810. « Théorie de la double réfraction. Mémoires », *CRAS*, vol. XXXIII.

Maxwell, James Cl.

1855. « On Faraday's Lines of Force », *Cambridge Philosophical Transactions*, vol. X.

1861. « On Physical Lines of Force », *PM*. 1861 : vol. XXV, pp. 161-75 (part. I) ; vol. XLIV, pp. 282-91 et LI, pp. 338-49 (part. II) ; 1862 : vol III, pp. 12-24 (part. III) vol. XIV pp. 85-95 (part. IV).

1865. « A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field ». *Phil. Trans. RS*. Publié le 1 janv. 1865. vol. CLV : pp. 459-512. <http://rspl.royalsocietypublishing.org/>

1873. *A Treatise on Electricity and Magnetism* (abrég : *Treatise*). Londres : MacMillian and Co. Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France

1878. « Ether », *Encyclopedia Britannica*, neuvième édition.

1881. *An Elementary Treatise on Electricity* (éd : W. Garnett). Oxford : Clarendon Press.

1884. *Traité élémentaire d'électricité* (trad : Gustave Richard). Paris : Gauthiers-Villars.

1885. *Traité d'électricité et de magnétisme* (trad : Gustave Séligmann-Lui, abrég : *Traité*), 2 volumes. Paris : Gauthiers-Villars.

1920. *Matter and Motion*. (éd. Joseph Larmor). New York : MacMillan and Co.

1965. *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. New York : Dover Publication, Inc., pp. 155-230 et pp. 451-513. <http://www.archive.org/details/scientificpapers01maxw>

Melon, Paul

1891. *L'enseignement supérieur et l'enseignement technique en France*. Paris : Armand Colin et Cie. Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France.

Mercadier, Ernest

1882. « Études sur les éléments de la théorie électrique », *LE*, vol. VII, p. 592-5.

Mermet Émile

1886. *Annuaire de la presse française - septième année*. Paris : chez l'auteur.

Michelson, Albert et Morley, Edward

1887. « On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether », *American Journal of Science*, vol. XXXIV (1887), pp. 333-45.

Monnier, Démétrius

1889. *Encyclopédie des travaux publics : Électricité industrielle — production et application*. Paris : Baudry et Cie.

Munro, John

1885. « Correspondance - Angleterre », *LE*, vol. XV, pp. 167-8.

Noad, Henry Minchin

1879. *The student's text-book of electricity*. 1879. Préface de William Preece. Londres : Crosby Lockwood and Co

Nodon, Albert

1898. « L'énergie et la théorie électromagnétique de la lumière », *L'Électricien*, vol. XVIII, pp. 53-4.

Palaz, Adrien

1886. « Recherches expérimentales sur la capacité inductive spécifique de quelques diélectriques », *LE*, vol. XXI, p. 97-101.

Parville, Henri de

1883. *L'électricité et ses applications*, deuxième édition. Paris : G. Masson. Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France.

Pellat, Henri

1891. « Détermination du rapport entre l'unité électromagnétique et l'unité électrostatique d'électricité », *Bul. SIE*, vol. VIII, pp. 226-7.

1896. « Électrostatique non fondée sur les lois de Coulomb. Forces agissant sur les diélectriques non électrisés ». *JdP*, vol. 5, 3e série, pp. 244-256.

Poincaré, Henri

1890. *Électricité et Optique*, 2 volumes. Paris : Georges Carré.

1894. *Les oscillations électriques*. Paris : Georges Carré.

1895. « À propos de la théorie de M. Larmor », *EE*, vol. III (1895), pp. 5-13 ; 289-95 et vol. V (1895), 5-14 et 385-92.

1899. *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes*. Chartres : Georges Carré et C. Naud.
1900. « La physique expérimentale et la physique mathématique », *RGSPA* vol. X, pp. 1163-1173.
1901. *Électricité et Optique*, deuxième édition. Paris : Gauthiers-Villars.
- 1904 (a). *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes : la télégraphie sans fil*. Paris : Gauthiers-Villars.
- 1904 (b). *Cours d'électricité professé à l'École Supérieure Professionnelle des Postes et Télégraphes*.
- 1904 (c). « L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique », *Bulletin des sciences mathématiques*, vol. 28, pp. 302-324.
1908. Devaux-Charbonnel. *État actuel de la science électrique*. Paris : Dunod et Pinat. Préface.
1911. *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques professées à la Sorbonne*. Paris : Hermann.
1953. « Les limites de la loi de Newton », *Bulletin Astronomique*, vol. XVII, pp. 121-178. Résumé d'un cours donné par Poincaré.

Potier, Alfred

- 1873 (a). « Sur l'électrodynamique et l'induction », *JdP*, vol. II, pp. 5-17 ; 121-9.
- 1873 (b). « Égalité des constantes numériques fondamentales de l'optique et de l'électricité », *JdP*, vol. II, pp. 377-88.
1876. « De l'entraînement des ondes lumineuses par la matière pondérable en mouvement », *JdP*, vol. V (1876), pp. 105-8.
1887. *Cours de physique à l'école polytechnique, 1^{ère} et 2^e division*, année 1887-1888 et 1888-1889. École Polytechnique.
1889. « Relation entre le pouvoir rotatoire magnétique et l'entraînement des ondes lumineuses par la matière pondérable », *CRAS*, vol. CVIII, pp. 510-3, séance du 11 mars 1889. séance du 16 avril 1888. Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France.
1893. *Cours de physique à l'école polytechnique, 1^{ère} division*, année 1893-1894. École Polytechnique.
1894. « Sur la propagation de l'électricité le long des conducteurs », *JdP*, vol. III, 3^e série, pp. 107-10.
1900. *Cours d'électricité industrielle aux Mines de Paris*, année 1900-1901 (rédaction des élèves).

Puyau, Ferdinand

1934. *Bulletin de la société de Borda*, p. XXVI-XXVII.

Raveau, Camille

1891 (a). « Exposé sur la théorie électromagnétique de Maxwell », *LE*, vol. XXXIX, pp. 351-60.

1891 (b). « Remarques sur la théorie électromagnétique de Maxwell », *LE*, vol. XXXIX, pp. 557-65.

1891 (c). « Recherches récentes sur les radiations électromagnétiques », *LE*, XLI pp. 166-74 ; 218-25 ; 257-264 ; 316-325 ; 368-375 ; 456-64 ; 518-26.

1892. « Théorie électromagnétique de la lumière d'après Maxwell », *LE*, vol. XLVI, p. 7-14 ; 106-9 ; 269-74 ; 474-8 ; 554-7 ; 667-71.

1893. « Sur les recherches récentes sur la théorie électromagnétique de la lumière », *LE*, vol. IL, pp. 7-12 ; 169-72 ; 263-7 ; 320-4 ; 415-8 ; 466-74 ; 514-9 ; 569-73 ; 617-20.

Royer, Henri

1907. *Cours d'électricité professé à l'école d'application du génie maritime pour l'année 1907-1908*.

Séligmann-Lui, Gustave

1886. « La théorie de l'électricité de Maxwell », *Bul. SIE*, vol. III, pp. 322-34.

Stoletow, Alexandre

1888. « Sur une sorte de courants électriques provoqués par les rayons ultra-violets », *CRAS*, vol. CVI, p. 1149-52.

1890. « L'éther et l'électricité », *LE*, vol. XXXV, pp. 517-20 ; 556-67.

Thomson, John Joseph

1889. « Note on the Effect Produced by Conductors in the Neighbourhood of a Wire on the Rate of Propagation of Electrical Disturbances along It, with a Determination of This Rate ». *PRS*. Publié le 1 janv. 1893. vol. XLVI : pp. 1-13. <http://rspl.royalsocietypublishing.org/>

Thomson, William

1856. « Dynamical Illustrations of the Magnetic and the Helicoidal Rotatory Effects of Transparent Bodies on Polarized Light ». *PRS*. Publié le 1 janv. 1856. vol VIII : pp. 150-158. <http://rspl.royalsocietypublishing.org/>

1872. *Reprint of Papers on Electricity and Magnetism*. Londres : MacMillan and Co. p. 244.

1882. *Mathematical and Physical Papers* (abrég. *MPP*). Londres : Cambridge University Press. Vol I : 76-79 ; 91-92. Vol II : 28-32 ; 41. Vol III : 498-517. Vol IV : 13-17. Vol VI : 204.

1889. *Popular Lectures and Addresses*, vol. 1. Londres : Macmillan and Co.

Tissandier, Gaston

1884. « Théodore du Moncel », *La Nature*, n°561, p 221-2.

Troost, Louis

1905. « Discours prononcé par M. Troost, président de l'Académie des sciences, lors de la séance du lundi 15 mai 1905 ». *Annales des Mines*, 10e série, vol. 7.

Vaschy, Aimé

1882. « Sur les unités mécaniques et électriques », *LE*, vol. VIII, p. 182-3.

1887. « Sur la téléphonie à grande distance », *LE*, vol. XXV, p. 18-22.

1888. « Sur la nature des actions électriques dans un milieu isolant », *LE*, vol. XXIII (1888), p. 131-3.

1890. *Traité d'électricité et de magnétisme*, 2 volumes. Paris : Baudry et Cie.

1894. « Nouvel exposé sur la théorie des phénomènes électriques et magnétiques », *Bul SIE*, vol. XI, p. 11.

1896. « Nature du courant de déplacement de Maxwell », *JdP*, vol. V, 3e série, pp. 570-2.

Verdet, Émile

1872. *Oeuvres de Verdet publié par les soins de ses élèves. Notes et mémoires par É. Verdet.*
Paris : Masson.

Violle, Jules

1883. *Cours de physique - Tome 1 : Physique moléculaire.* Paris : Masson.

1892 (a). *Cours de physique - Tome 2 : Acoustique et Optique*, 2 volumes. Paris : Masson.

1892 (b). *Lehrbuch der physik*, 2 volumes. Springer.

Waha, M. de

1881. « Théorie des phénomènes électriques », *LE*, vol. III, p. 110-1.

Wien, Wilhelm

1898. « Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen », *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 65, *Beilage* i-xvii.

1900. « Über die Möglichkeit einer elektromagnetischen Begründung der Mechanik » dans « Recueil de travaux offerts par les auteurs à H. A. Lorentz à l'occasion du 25ème anniversaire de son doctorat le 11 décembre 1900 », *Archives Néaerlandaises*, série 2, vol. 5, pp. 96-107.

Wilkinson, Henry D.

1887. « Maxwell's theory of electricity », *The Electrician*, vol. XVIII, p. 309-12.

Wolf, Charles

1902. *Histoire de l'Observatoire de Paris de sa fondation à 1793.* Paris : Gauthiers-Villars.

Young, Thomas

1801. « On the Theory of Light and Colours », *The Bakerian Lectures*, lu le 12 novembre 1801
II, pp. 12-49.

Institutions

Académie de Grenoble

1894. *Académie de Grenoble : Programme de l'université. Année 1894-1895*. Grenoble : Xavier Drevet. p. 52-3 ; 62-3.

Bulletin de la Société Internationale des Électriciens (abrég. Bul. SIE)

1884. vol. I, p. 1. (Préface)

1885. « Assemblée générale ordinaire du 8 avril 1885 », vol. II, pp. 85-92, « Compte rendu de l'Exposition d'électricité », vol. II, pp. 93-105.

1900. « Bibliographie », vol. XVII, p. 185-6. Revue de Poincaré 1899.

Collège de France

1902. *Annuaire du Collège de France, 1902-1903*.

Conseil municipal de Paris

1882. *Rapport présenté par M. Levraud, au nom de la 4^e commission, sur un projet d'appropriation à usage d'école de physique et de chimie industrielles de divers bâtiments de l'ancien collège Rollin*. Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France.

Conservatoire National des Arts et métiers (abrég. CNAM)

1882. *Rapports de cours de 1853 à 1882*. Date non référencée

1890. *Rapport de la commission d'attribution de la chaire d'électricité*. Date non référencée.
Dossier de candidature à la chaire d'électricité industrielle.

1910. *Rapports de cours de 1883 à 1910*. Date non référencée

École du Génie et de l'Artillerie

1895. « Rapport du capitaine d'artillerie professeur du cours de sciences appliquées sur les résultats obtenus aux interrogations du cours d'électricité professé aux officiers-élèves de la 2eme division », 27 novembre 1895, dans : Compléments au conseil de perfectionnement, titre III, section 3, contenue de l'enseignement, § b enseignement scientifique et technique, carton 6 1859-1901, École Polytechnique.

École Nationale Supérieure des Mines de Paris (abrév. ENSMP)

1889. *Programme des cours de l'école nationale supérieure des Mines*, par A. Carnot, inspecteur de l'école.

1900. *Catalogue de la bibliothèque de l'École Nationale Supérieure des Mines*, 2 volumes. Paris : Imprimerie nationale.

École Nationale des Mines de Saint-Étienne

1901. Lettre de mars 1901, le Ministre au directeur de l'école des Mines de Saint-Étienne M. Tauzin. Archives de l'École des Mines de Saint-Étienne. (Archives départementales de la Loire)

École Nationale des Ponts et Chaussées (abrév. ENPC)

1897. *Programme de l'enseignement intérieur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*. Paris : Imprimerie Nationale,

École Polytechnique

1874. *Programme des enseignements intérieurs 1874-75*. Date non référencée.

1881. *Catalogue de la bibliothèque de l'école polytechnique*. Paris : Gauthiers-Villars.

1884. *Cahier des sommaires du cours, 1794-1884*. Date non référencée.

1886. *Programme des enseignements intérieurs 1886-87*. Date non référencée.

1887. *Registre des candidats admissibles en 1887*. Date non référencée.

1889. *Registre des élèves 1887-1888 et 1888-1889*. Date non référencée.

- 1894 (a). *Décret du 13 mars 1894 portant règlement sur l'organisation de l'École Polytechnique*. Paris : Librairie militaire de L. Baudoin. Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France.
- 1894 (b). *Comptes Rendus du Conseil d'instruction, de 1862 à 1894*, volume 9.
- 1894 (c). *Comptes Rendus du Comité de perfectionnement*, année 1894-1895.
1895. *École polytechnique, livre du centenaire, 1794-1894*. Tome 1. Paris : Gauthiers-Villars. Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France.
1898. *Programme des enseignements intérieurs 1898-99*. Date non référencée.
1903. *Révision des programmes d'admission et d'enseignement intérieur de l'École Polytechnique*.
1929. *Cahier du corps enseignant de 1854 à 1929*. Date non référencée.
1954. *Registre du personnel enseignant de 1900 à 1954*. Date non référencée.

École Supérieure d'Électricité (abrév. ESE)

1899. *Programme des conditions d'admission et de l'enseignement pour l'année 1899-1900*. Paris. Librairie Nony et Cie.

Faculté des sciences de Lyon

1896. Procès verbal de la séance du 30 juin 1896 de la faculté des sciences de Lyon. (Dossier 583 W 1, Archives départementales du Rhône).

***Elektrotechnischer Zeitschrift* (abrév. EZ)**

1891. vol. 12, p. 593.

***Journal de Physique* (abrév. JdP)**

1872. « Liste des collaborateurs », vol. I, p. 1 ; « Introduction », vol. I, p. 5-6.
1873. « Liste des collaborateurs », vol. II, p. 1.
1897. 3e série, vol. VI.
1901. *Table analytique - Table par noms d'auteurs des trois premières séries du Journal de Physique 1872-1901*. Tours : Imprimerie Delisle.

Journal Officiel (abrég. JO)

Années 1880 à 1908. *Journal Officiel de la République française*. Source : gallica.bnf.fr
- Bibliothèque Nationale de France.

La Lumière Électrique (abrég. LE)

1879. « Notre programme », vol. I, p. 6 ; « Table des matières », vol. I, pp. 241-4.

1884. « Avis aux lecteurs », vol. XI (1884), p. 3.

La Nature

1873. vol. I, préface.

1889. « Les rayons électriques. Expériences de M. le docteur Hertz », 2e semestre, p. 51.

1894. « H. Hertz », 1er semestre, p. 110.

L'Éclairage Électrique (abrég. EE)

1897. vol. XI, numéro du 17 avril 1897, p. 145 ; numéro du 22 mai 1897, p. 365.

1898. vol. XVI, Supplément pp I à CXII.

L'Électricien

1881. « Au lecteur », vol. I, p. 1.

1884. « Bibliographie », vol. VIII, p. 520. Revue de Maxwell 1884.

1885. « Présentation de l'exposition d'électricité », numéro du 28 mars 1885, p. 1.

The Electrician (abrég. The Elec.)

1889. vol. XXII, p. 308 (commentaire sur le discours de W. Thomson).

1891. « The Ether », vol. 28, p. 58 (lettre à l'éditeur).

1893. vol. XXXI, p. 545 (éditorial).

Ministère des Postes et Télégraphes

1881. *Catalogue général officiel - Exposition internationale d'électricité*. Paris : A. Lahure.
Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque Nationale de France.
1882. *Congrès international des électriciens. Paris 1881. Compte-rendu des travaux*. Paris : G. Masson.

Nature

1893. « Physics at the British Association », vol. 48, n° 1248, pp. 525-9.

Observatoire de Paris

1878. *Rapport annuel sur l'état de l'Observatoire de Paris pour l'année 1878*.
1882. *Lettre sur l'organisation de l'exposition d'électricité du 13 mars 1882*. Du directeur de l'Observatoire au ministre.
1890. *Rapport annuel sur l'état de l'Observatoire pour l'année 1889*, séance 4 mars 1890, p. 4.
1893. *Rapport annuel sur l'état de l'Observatoire pour l'année 1892*, séance du 14 janvier 1893, p. 29.
1907. *Rapport annuel sur l'état de l'Observatoire pour l'année 1906*, séance 12 mars 1907, p. 18.

Office National des Universités et Écoles françaises

1914. *Les universités et les écoles françaises - Enseignement supérieur, enseignement technique*. Paris. Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque Nationale de France.

Revue générale des sciences pures et appliquées (abrég. RGSPA)

- 1892 (a). « Académies et sociétés savantes - Société Physique de Londres », vol. III, pp. 460-2.
- 1892 (b). « Académies et sociétés savantes - Académies des sciences d'Amsterdam », vol. III, pp. 590 ; 838-9.
1895. « Table des matières », vol. VI, p 1109-32.

Revue scientifique

1889. « Les expériences de Hertz au laboratoire central », *Revue scientifique*, vol. XVII, p. 807-8.

Les informations sur certaines publications des auteurs mentionnées sont tirées du *Catalogue of Scientific Papers (1800-1900)* de la Royal Society of London, accessible sur la bibliothèque en ligne Hathitrust : <https://catalog.hathitrust.org/Record/001179553>

Les informations personnelles pour plusieurs protagonistes français sont tirées de la base « Léonore » listant les récipiendaires de la Légion d'Honneur : http://www2.culture.gouv.fr/documentation/leonore/NOMS/nom_00.htm

Bibliographie secondaire :

Atten, Michel

1992. « Les Théories électriques en France. 1870-1900. La contribution des mathématiciens, des physiciens et des ingénieurs à la construction de la théorie de Maxwell ». Thèse. École des hautes études en sciences sociales.
1993. « L'œuf ou la poule. Science et techniques de l'électricité en France (1850-1900) », *Revue de la recherche scientifique*, vol. 11, n°61. Vers une nouvelle pensée visuelle. pp. 113-123

Bart, David et Bart, Julia

2008. « Sir William Thomson, on the 150th Anniversary of the Atlantic Cable », *Antique Wireless Association Review*, vol. 21.

Béguet, Bruno

1990. *La science pour tous : sur la vulgarisation scientifique en France de 1850 à 1914*. Paris : Bibliothèque du CNAM.

Belhoste, Bruno

1989. « Les origines de l'École polytechnique. Des anciennes écoles d'ingénieurs à l'École centrale des Travaux publics ». *Histoire de l'éducation*, vol. 42, pp. 13-53.
1990. « L'enseignement secondaire français et les sciences au début du XXe siècle. La réforme de 1902 des plans d'études et des programmes. », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 43, n°4. L'enseignement scientifique au tournant des XIXe et XXe siècles. pp. 371-400.
2001. « La préparation aux grandes écoles scientifiques au XIXe siècle : établissements publics et institutions privées ». *Histoire de l'éducation*, vol. 90, pp. 1-23.

Beltran, Alain

1991. *La fée électricité*. Paris : Gallimard.

Beltran, Alain et Carré, Patrice

2016. *La vie électrique. Histoire et imaginaire (XVIIIe - XXIe siècle)*. Paris : Belin.

Billoux, Claudine

1989. « Les archives de l'École Polytechnique ». *La gazette des archives*. vol. 145, p. 132.

Birck, Françoise et Grelon, André (dir.)

2006. *Un siècle de formation des ingénieurs électriciens : Ancrage local et dynamique européenne, l'exemple de Nancy*. Éditions de la Maison des sciences de l'homme.

Blanc, Wilfried et Bogaert, Gilles

2012. « La mesure de la vitesse de la lumière, de Cornu à Perrotin ». pp. 33-37. HAL archives ouvertes (hal-00848306).

Blay, Michel et Halleux, Robert

2017. *La science classique, XVIe-XVIIe siècles : dictionnaire critique*. Paris : Flammarion.

Blewett, John P.

1998. « Synchrotron Radiation : Early History » *Journal of Synchrotron Radiation*, vol. 5, pp. 135-139.

Blondel, Christine

1990. « Négociations entre savants, industriels et administrateurs : les premiers congrès internationaux d'électricité » *Relations internationales*, n°62, pp. 171-182.

Bouvier, Yves

2008. « Les revues d'électricité et la construction d'une communauté internationale de pratique technologique à la fin du XIXe siècle », *Le Temps des médias*, vol. 2, n°11, pp. 72-81.

Bracco, Christian

2004. Cédérom Histoire des idées sur la lumière, de l'Antiquité au début du XXe siècle. (CRDP de Nice : 2004). Texte intégral : <https://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/sfo-00321414>

2017. *Quand Albert devient Einstein*. Paris : CNRS Éditions.

Bracco, Christian et Haspot, Samuel

2015. « Augustin Fresnel », *Cahiers Clairaut*, vol. 150, pp. 33-37.

Bracco, Christian et Provost, Jean-Pierre

2006. « La Relativité de Poincaré de 1905 et les Transformations Actives », *Archives for History of Exact Sciences*, vol. 60, pp. 337-351.

2014. « La relativité d'Einstein au premier ordre en V/c Remarques pédagogiques et historiques », *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, vol. 108, pp. 533-46.

Buchwald, Jed Z.

1981. « The quantitative ether in the first half of the nineteenth century » dans Cantor et Hodge 1881, pp. 215-237.

1985. *From Maxwell to microphysics*. Chicago : University of Chicago Press.

1989. *The rise of the wave theory of light*. Chicago : University of Chicago Press.

1994. *The creation of scientific effects : Heinrich Hertz and electric waves*. Chicago : University of Chicago Press.

Bustamante, Martha

2005. « Naissance et premiers pas de la SFP 1873 - 1905 », *Bulletin de la Société Française de Physique*, vol. 149, pp. 15-9.

Butrica, Andrew J.

1986. « From inspecteur to ingénieur : telegraphy and the genesis of electrical engineering in France, 1845-1881 ». *Retrospective Theses and Dissertations*. Paper 7982.

Cantor, Geoffrey et Hodge, M.J.S (éds.)

1981. *Conceptions of ether : Studies in the history of ether theories 1740-1900*. Cambridge : Cambridge University Press.

Cardot, Fabienne

1989. « L'éclair de la favorite ou l'électricité a l'Exposition de 1889 ». *Le Mouvement Social*, vol. 149, n°43. Consulté sur Jstor <http://www.jstor.org/stable/3778405>

Cardot, Fabienne et Caron, François (dir.)

1991. *Histoire de l'électricité en France. Tome premier : espoirs et conquêtes (1881-1918)*. Paris : Fayard.

Chevenard, Pierre

1951. « Cérémonie du centenaire de la naissance d'Arsène d'Arsonval » à la Sorbonne, par Pierre Chevenard, mardi 23 octobre 1951.

Coelho Abrantès, Paulo

1985. *La réception en France des théories de Maxwell concernant l'électricité et le magnétisme*. Thèse. Université de Paris I.

Combes, Michel et Eisenstaedt, Jean

2011. « Arago et la vitesse de la lumière (1806-1810), un manuscrit inédit, une nouvelle analyse », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 64, pp. 59-120.

Combet, Georges

1978. « L'argot de l'X et sa rhétorique », *La Jaune et la Rouge*, n°331.

Costabel, Pierre

1987. « L. Foucault et H. Fizeau : exploitation d'une information nouvelle », *La Vie des Sciences*, tome 1, n°3, pp. 235-249.

Crandall, Stephen ; Dahl, Norman et Lardner, Thomas

1959. *An Introduction to the Mechanics of Solids*. Boston : McGraw-Hill.

Darrigol, Olivier

2000 (a). « Poincaré, Einstein, et l'inertie de l'énergie », *CRAS*, série IV, vol. 1, pp. 143-53.

2000 (b). *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. New York : Oxford University Press.

2005 (a). *Les équations de Maxwell de MacCullagh à Lorentz*. Paris : Belin

2005 (b). *Worlds of Flow : A History of Hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*. Oxford : Oxford University Press. Ed 2008.

2012. *A history of optics*. Oxford : Oxford University Press.

Degos, Jean-Guy et Prat, Christian

2008. « L'échec du canal de Panama : Des grandes espérances à la détresse financière », *Revue française de gestion*, vol. 8, n° 188-189, pp. 307-24.

Dubois, Patrick

2002. « MERCADIER (E.) », *Le dictionnaire de pédagogie et d'instruction primaire de Ferdinand Buisson : répertoire biographique des auteurs*. Paris : Institut national de recherche pédagogique. p. 106.

Flammarion, Camille

.1908. « L'Astronome Janssen », *Bulletin de la Société Astronomique de France et Revue Mensuelle d'Astronomie, de Meteorologie et de Physique du Globe*, vol. 22, pp.25-28. Consulté sur NASA ADS, <http://articles.adsabs.harvard.edu//full/1908BSAFR..22...25F/0000035.000.html> le 12/04/2020.

Fontanon, Claudine et Grelon, André

1994. *Les professeurs du Conservatoire National des Arts et Métiers. Dictionnaire biographique 1794-1955*, 2 volumes. Paris : Institut national de recherche pédagogique.

Fox, Robert et Guagnini, Anna (eds.)

1993. *Education, Technology and Industrial Performance in Europe, 1850–1939*. Cambridge : Cambridge University Press.

Fröman, Olof

1994. « Historical Background of the Tachyon Concept », *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 48, pp. 373–380.

Garçon, Anne-Françoise

2004. *Entre l'État et l'Usine. L'École des Mines de Saint-Étienne au XIXe siècle*. Rennes : Presses universitaires de Rennes. Source : OpenEditionBooks.

Ginoux, Jean-Marc

2011. « Les conférences « oubliées » d'Henri Poincaré : les cycles limites de 1908 », Bibnum [En ligne], *Sciences de l'ingénieur*, mis en ligne le 01 mars 2011, consulté le 26 août 2020. URL : <http://journals.openedition.org/bibnum/860>.

Grelon, André

1991. « Les enseignements de l'électricité » pp. 254-93 ; « La formation des hommes : du tournant du siècle à la Première Guerre mondiale », pp. 802-48 ; dans Cardot et Caron 1991.
1993. « The training and career structures of engineers in France, 1880-1939 » pp. 42-65 ; dans Fox et Guagnini 1993.
2006. « Les universités et la formation des ingénieurs électriciens : naissance d'une filière » pp. 3-19 ; « L'institut électrotechnique de Nancy, 1900-1914. Note sur la naissance d'une communauté enseignante », pp. 91-100 ; dans Birck et Grelon 2006.

Guyon, Étienne, Hulin, Jean-Pierre, Petit Luc

2012. *Hydrodynamique physique*. Paris : CNRS Éditions/ EDP Sciences.

Havelange Isabelle, Huguet Françoise et Lebedeff-Chopin Bernadette

1986. *Les Inspecteurs généraux de l'Instruction publique. Dictionnaire biographique 1802-1914*. Paris : INRP/CNRS.

Heilbron, John L.

1976. « Robert Symmer and the Two Electricities », *Isis*, vol. 67, n°1, pp. 7-20.
1979. *Electricity in the 17th and 18th centuries*. Berkeley : University of California Press.
1981. « The electrical field before Faraday » dans Cantor et Hodge 1981, pp. 187-213.
1982. *Elements in early modern physics*. Berkeley : UCP

Hunt, Bruce J.

1986. « Experimenting on the Ether : Oliver J. Lodge and the Great Whirling Machine », *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*. vol. 16, n°1, pp.111-134. <http://www.jstor.org/stable/27757559>
1991. *The Maxwellians*. New York : Cornell University Press.

Hutchison, Iain

- 2009 « Lord Kelvin and Liberal Unionism », *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 158 012004

Huth, Arno

1937. *La radiodiffusion puissance mondiale*. Paris : Gallimard.

Institut national de recherche pédagogique

1982. « Loi du 16 juin 1881 », *Publications de l'Institut national de recherche pédagogique* ;, p. 148. www.persee.fr/doc/inrp_0000-0000_1982_ant_1_1_3570 consulté le 20/04/2020.

Jackson, John David

2001. *Électrodynamique classique*, 3e édition. Paris : Dunod.

Janssen, Michael H.P.

1995. « A comparison between Lorentz's ether theory and special relativity in the light of the experiments of Trouton and Noble ». PhD. University of Pittsburgh.

Kaufmann, Vincent et Montulet, Bertrand (dir.)

2004. *Mobilités, fluidités-libertés ?*. Bruxelles : Presses de l'université de Saint-Louis.

Katzir, Shaul

2003. « The Discovery of the Piezoelectric Effect », *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 57, n° 1, pp. 61-91.

Landau, Lev D. et Lifshitz, Evgueni M.

1980. *Courses of Theoretical Physics*, vol. 2, 4e édition (trad. : Morton Hamermesh). Butterworth-Heinemann.

Langevin, Jean

1972. « Cent ans de *Journal de Physique* », *Journal de Physique*, vol. 33, n° 1, pp. 1-8.

Lequeux, James

2014. *Hippolyte Fizeau, physicien de la lumière*. Paris : edp sciences.

Lundqvist, Stig

1998. *Nobel Lectures : Physics 1901-1921*. World Scientific.

Matiz, Andrés Martínez

2004. *Les origines et les premières années de la Société Française de physique (1873-1905)*. Mémoire de DEA. Université Paris 7 - Denis Diderot.

Nio, Nicolas

2017. *L'éther électromagnétique au XIXe siècle : Modèles et diffusion dans les journaux pour ingénieurs*. Mémoire de Master 2. Université Paris Diderot.

Pelseneer, Jean

1944. *Zénobe Gramme*. Bruxelles : Lebègue et Cie.

Pocock, Rowland F.

1988. *The Early British Radio Industry*. Manchester : Manchester University Press. pp. 52–55

Prost, Antoine

1968. *Histoire de l'enseignement en France, 1800-1967*. Paris : A. Colin.

Ramunni, Girolamo

1995. *Cent ans d'histoire de l'École supérieure d'électricité 1894-1994*. Saxifrage

Robineau, Didier

2019. *L'introduction de l'électricité dans la marine militaire, 1880 – 1935*. Thèse. Université de Nantes

Rodriguez-Quiñonez, Julio C. et Sergiyenko, Oleg

2016. *Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision*. IGI Global.

Rollet, Laurent

1996. « Henri Poincaré - Vulgarisation scientifique et philosophie des sciences », *Philosophia Scientiae*, vol. 1, n° 1, pp. 125-53.

2017. *La correspondance de jeunesse de Henri Poincaré* (éd). Bâle : Birkhäuser.

Roseveare, N.T

1982. *Mercury Perihelion from Le Verrier to Einstein*. Oxford : Oxford University Press.

Samuëli, Jean-Jacques

2009. « Foucault et la mesure de la vitesse de la lumière dans l'eau et dans l'air », Bibnum [En ligne], Physique, mis en ligne le 01 septembre 2009, consulté le 30 avril 2019. <http://journals.openedition.org/bibnum/788>

Savoie, Philippe

2013. *La construction de l'enseignement secondaire (1802-1914). Aux origines d'un service public..* Lyon : ENS Éditions. Publié sur OpenEdition Books le 27/06/2017.

Shankland, Robert S.

1963. « Michelson-Morley Experiment », pp. 16-35.

Siegel, Daniel M.

1981. « Thomson, Maxwell, and the universal ether in Victorian physics » dans Cantor et Hodge 1881, pp. 239-268.

1991. *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory : Molecular vortices, displacement current, and light.* Cambridge : Cambridge University Press.

Steinle, Friedrich

2016. *Exploratory Experiments : Ampère, faraday, and the Origins of Electrodynamics.* Pittsburgh : University of Pittsburgh Press.

Taltavull, Marta Jordi

2013. « Sorting Things Out : Drude and the Foundations of Classical Optics » dans : Massimiliano Badino and Jaume Navarro (éds.), *Research and Pedagogy : A History of Quantum Physics through Its Textbooks.* 2013. Berlin : Neopubli GmbH.

Vincent, Guy

1972. « Histoire et structure du système scolaire français : l'enseignement primaire. », *Revue française de sociologie*, vol. 13-1, pp. 59-79 ;

Walter, Scott (éd.)

2007. *La correspondance entre Henri Poincaré et les physiciens, chimistes et ingénieurs*. Bâle : Birkhäuser.

2016. *La correspondance entre Henri Poincaré, les astronomes, et les géodésiens*. Bâle : Birkhäuser.

Whittaker, Edmund T.

1910. *A history of the theories of aether and electricity*. Londres : Longman, Green and Co.
<http://www.archive.org/details/historyoftheorie00whitrich>

Zahar, Élie

2000. *Essai d'épistémologie réaliste*. Paris : Libr. philosophique J. Vrin.

Les citations mises en épigraphes sont tirées de :

- Jules Verne, *L'île mystérieuse*. 1874. Jules Hetzel et Cie. p. 548.
- Hasok Chang, *Is Water H₂O ? Evidence, Realism and Pluralism*. 2012. Springer. p. xvii.
- Edmond Rostand, *Cyrano de Bergerac*. 1897. Acte III, scène 13.
- Heaviside 1892, vol. 1, p. 433.
- Arthur C. Doyle, *Le signe des 4* (trad. Landa), éd : Le livre de poche, p. 75-6.
- Hergé, *Les Bijoux de la Castafiore*. 1963. Casterman. p. 40.
- Daniel Defoe, *Robinson Crusoe*. (trad. Pétrus Borel). 1836. Paris : Borel et Varenne. p. 102.
- Henri de Parville, Parville 1883, p. 14.
- Arthur C. Doyle, « Les 5 pépins d'orange » dans *Les aventures de Sherlock Holmes — L'intégrale des nouvelles* (trad. Wittersheim), éd : Omnibus, p. 78.
- Gustave Séligmann-Lui, Séligmann-Lui 1886, p. 334.
- Alexander Stoletow, Stoletow 1890, p. 567.
- Arthur C. Doyle, *Le signe des 4, op. cit.*, p. 85.

Index

A

Académie de Berlin (prix de l'), 101
Action et réaction (principe de l'), 108, 363, 389
Alheilig, François, 194
Almeida, Charles d', 264
Ampère, André-Marie, 47
Arago, François, 156
Arts et Métiers (écoles d'), 150

B

Bath (colloque de), 104
Becquerel, Edmond, 136, 242
Becquerel, Henri, 157, 159, 176
Berger, Georges, 136, 143
Blavier, Édouard, 141
Blondel, André, 199
Blondin, Jules, 303, 315
Brunhes, Bernard, 275, 314
Buquet, Paul, 150

C

Cavarlay (Aubusson de), Henri, 185, 195
Chappuis, Louis, 231, 284
CNAM, 149, 242
Cochery, Adolphe, 136
Congrès des électriciens, 134, 140

Conservatoire des Arts et Métiers , *voir*
CNAM
Cornu, Alfred, 157, 159, 303
Coulomb, Charles-Augustin, 44, 130, 163
Curie, Pierre, 148, 217

D

Darmstadt (Institut technique de), 147
Deprez, Marcel, 141, 144
Dispersion optique, 113
Dufay, Charles-François, 44
Duhem, Pierre, 91, 274

E

Éclairage Électrique (L'), 303, 367
École Centrale des Arts et Manufactures, 132, 150, 230
École de l'Artillerie et du Génie, 192
École des Mines, 130, 192
bibliothèque de l', 206
École des Mines de Saint-Étienne, 369
École des Ponts et Chaussées, 130, 192
École du Génie Maritime, 130, 185, 192
École Municipale de Physique et Chimie Industrielles , *voir* EMPCI
École Normale Supérieure, 247
École Polytechnique, 131, 155

bibliothèque de l', 160
 École royale du Génie de Mézières, 130
 École Supérieure de Télégraphie , *voir*
 EST
 Edison, Thomas, 135
Electrician (The), 95, 327
Électricien (L'), 276
 Électron, 117
 EMPCI, 147, 216
 Équation de Poisson, 45
 ESE, 252
 EST, 146, 236
 État électrotonique, 51
 États correspondants (principe des), 116
Éther, 74, 107, 114, 119, 168, 202, 224,
 318
 coefficient d'entraînement partiel de l',
 176
 optique, 172
 rotationnel, 121
 Exposition Internationale d'Électricité de
 1881, 133, 184

F
 Facultés (enseignement dans les), 132
 Faraday
 effet, 55
 expérience d'induction de, 51
 expérience de rotation de, 50
 Michael, 50
 Ferraris, Galileo, 134, 141, 228
 FitzGerald, Georges Francis, 80
 Fizeau, Hippolyte, 141, 439
 Fontaine, Hypolite, 135, 141
 Force magnétoélectrique, 96

Franklin, Benjamin, 44
 Fresnel, Augustin, 156, 431

G

Galvani, Luigi, 45
 Galvanisme , *voir* Galvani
 Galvanomètre, 47
 Gariel, Charles-Marie, 148, 195
 Gaulard, Lucien, 143
 Gérard, Éric, 147, 220
 Gilbert, William, 43
 Gramme
 machine de, 170
 Zénobe, 135
 Gray, Stephen, 44
 Guillaume, Charles-Édouard, 268

H

Hauksbee, Francis, 44
 Heaviside
 équation de, 94
 Oliver, 92, 328
 Helmholtz
 Hermann (von), 134, 141
 théorie de, 100, 325
 Hertz
 expériences de, 99, 221, 283, 318
 théorie de, 105, 318, 354, 447
 Herz, Cornélius, 135, 144, 276, 299
 Hospitalier, Édouard, 139, 148, 150, 216,
 281, 465

I
 Instituts électrotechniques, 151, 255

J
 Jablochhoff, Paul, 141

Jamin, Jules, 136, 141, 157, 159

Janet, Paul, 145, 148, 247

Journal de Physique, 264

K

Kirchhoff, Gustav, 134, 141

L

Laboratoire Central d'Électricité, 145

Larmor

Joseph, 118

théorie de, 118, 316, 390

Lauth, Charles, 147

Le Chatelier, Henri, 269

Ledeboer, Pierre-Hugo, 311

Leyde, bouteille de, 44

Liénard

Alfred-Marie, 367

articles, 377, 503

cours, 373

force de, 395

Liénard-Wiechert (potentiels de), 401, 511

Lignes de force, 58, 210

Lodge

expériences de, 120

Oliver, 87, 219, 271

Lorentz

jubilé de, 363

théorie de, 112, 356, 382, 390

Lumière Électrique (La), 276, 299

M

MacCullagh, James, 80

Machines électromécaniques, 169

Magnétisme, 163, 208

Mascart, Éleuthère, 136, 145, 242

Maxwell

équations de, 66, 445

Dynamical Theory of the

Electromagnetic Field, 71, 241, 312

On Faraday's Lines of Force, 59

On Physical Lines of Force, 61

courants de déplacement de, 70

James Clerk, 59, 159

modèle de, 62, 283

Mercadier, Ernest, 141, 308

Michelson et Morley (expérience de), 109,
272

Modèles mécaniques, 83

Moncel (du), Théodore, 136, 276, 300

Monge, Gaspard, 130

Monnier, Démétrius, 150, 235, 305

Montefiore (Institut), 147, 220

N

Nerville (de), Guillebot, 145

Neumann (théorie de) , *voir* Helmholtz

O

Observatoire de Paris

exposition à l', 293

Ørsted (expérience d'), 43, 167

Ondes électromagnétiques, 102

P

Pacinotti, Antonio, 135

Panama (scandale de), 302

Parville (de), Henri, 137

Pile électrique, 46

Poincaré, Henri, 303, 326, 337

Électricité et Optique, 340

cours à la Sorbonne, 338

Poincaré, Lucien, 268
 Potentiel électrique, 165
 Potier, Alfred, 157, 159, 265, 304
 Poynting, John Henry, 82
 Preece, William, 280

R

Raveau, Camille, 313
*Revue Générale des Sciences Pures et
 Appliquées*, 268
 Royer, Henri, 195

S

Séligmann-Lui, Gustave, 234, 283
 Sénarmont (de), Henri, 157
 SFP, 264, 273
Bulletin de la, 264
 SIE, 143
Bulletin de la, 282
 Siemens (von), Werner, 134
 Société Française de Physique , *voir* SFP
 Société Internationale des Électriciens ,
voir SIE
 Sorbonne (Groupe), 311, 325
 Stokes, Georges Gabriel, 81
 Stoletow, Alexander, 318, 475
 Symmer, Robert, 44

T

**Théorie électromagnétique de la
 lumière**, 68, 179, 205, 240, 324
 Théories des fluides électriques, 44, 161,
 425
 Thomson, Joseph John, 117
 Thomson, William, 57, 134, 141
 Tramway, 139

U

Unités, 142

V

Vaschy, Aimé, 237, 267
 Verdet, Émile, 157, 158
 Violle, Jules, 141, 247, 265
 Volta, Alessandro, 46
 Vortex-atomes (hypothèse des), 86
 Vortex-éponge (modèle du), 86

W

Weber (théorie de) , *voir* Helmholtz

Z

Zeeman (effet), 117
 Zurich (Institut fédéral et technologique
 de), 147

RÉSUMÉ

Sur la deuxième moitié du XIXe siècle, deux mouvements en rapport avec les phénomènes électriques se développent. Premièrement, les applications de l'électricité pour l'industrie se multiplient, avec les machines électromécaniques, l'éclairage électrique ou la télégraphie sous-marine. D'autre part, plusieurs théories de l'électromagnétisme émergent, dont certaines se basent sur le concept central de milieu de propagation, notamment en Grande-Bretagne autour de James C. Maxwell. Notre travail vise à mieux comprendre la diffusion des connaissances sur l'éther entre le domaine de la théorie et celui des applications. L'étude de la formation théorique des élèves au sein des établissements de l'enseignement technique supérieur (*grandes écoles*, instituts électrotechniques, ...), et de la diffusion par des moyens divers (journaux, ouvrages, conférences) permet d'avoir une idée plus précise des connaissances transmises sur ces théories électromagnétiques et sur l'éther.

MOTS CLÉS

Éther – Théories – Électromagnétisme – Enseignement – Revues électriciennes

ABSTRACT

In the second half of the 19th century, two movements related to electrical phenomena developed. First, applications of electricity for industry are increasing, with electromechanical machines, electric lighting or underwater telegraphy. On the other hand, several theories of electromagnetism are emerging, some of which are based on the central concept of propagation medium, notably in Britain around James C. Maxwell. Our work aims to better understand the diffusion of knowledge about the ether between the field of theory and that of applications. The study of the theoretical training of students in schools of technical higher education (*grandes écoles*, electrotechnical institutes, ...), and of the diffusion by various means (newspapers, books, lectures) allows to have a more precise idea of the transmitted knowledge about electromagnetic theories and ether.

KEYWORDS

Ether – Theories – Electromagnetism – Education – Electrical reviews