

UNIVERSITE DE PARIS I

PANTHEON - SORBONNE

**LA RECEPTION EN FRANCE**  
**DES**  
**THEORIES DE MAXWELL**  
**CONCERNANT**  
**L'ELECTRICITE ET LE MAGNETISME**

PAR

PAULO CESAR COELHO ABRANTES

THESE

POUR LE DOCTORAT DE TROISIEME CYCLE

Directeur de Recherches:

Mademoiselle le Professeur S. BACHELARD

Soutenue le 22 mars 1985 devant la Commission  
d'Examen: Mlle. S. BACHELARD, M. J. Merleau-Ponty,  
M. E. COUMET, M. P. HAMANDJIAN :

PARIS 1985

Je voudrais en premier lieu remercier vivement Mlle. le Professeur Suzanne BACHELARD, Directeur de l'Institut d'Histoire des Sciences et des Techniques de l'Université de Paris I, qui a très aimablement accepté de diriger cette thèse.

Je tiens aussi à exprimer ma sincère reconnaissance à M. P. HAMMANDJIAN, chercheur du Centre National de la Recherche Scientifique, pour les fructueuses discussions que nous avons eues, qui ont été des moments privilégiés d'approfondissement de mes idées.

D'autre part, je voudrais remercier M. le Professeur Ernest COUMET, de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, qui s'est toujours intéressé à la progression de ce travail.

L'aide de mes amis Dauí CORREA, qui a fait la dactylographie et Loys SCHMIED, qui a fait la révision du français de la majeure partie du texte, a été déterminante pour l'accomplissement du travail. Leur dévouement et patience m'ont touché profondément.

Je voudrais manifester ma gratitude à Veronique LEVESQUE, Françoise LONGY, Catherine SANTEFF, Martine NICARD, Brigitte AGOFROY, Bene RUBINI, Brigitte RAMEL, Maria José SAPORSKI, Tina SCHUMACHER et Carlos VILLEGAS, qui ont donné une émouvante démonstration de leur amitié en m'apportant une aide précieuse.

Ce travail a pu être mené à bien grâce à une bourse d'études du "Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico" (Brésil).

A mon fils TIAGO

TABLE DES MATIERES

---

INTRODUCTION . . . . .	1
CHAPITRE I : LE DEBUT DE LA RECEPTION EN FRANCE DES THEORIES DE MAXWELL EN ELECTRICITE ET EN MAGNETISME . . .	11
Section I.1 Quand les théories de Maxwell ont-elles été connues en France ? Le cas Emile Verdet . . .	11
Section I.2 Chronologie de la réception en France des théories de Maxwell en électricité et en magnétisme . . . . .	23
CHAPITRE II : DEUX REACTIONS EN FRANCE A LA PUBLICATION DU <u>TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM</u> :	
J. Bertrand et A. Potier . . . . .	27
Section II.1 La place de J. Bertrand dans la réception en France des théories de Maxwell . . . . .	28
Section II.2 A. Potier et la théorie électromagnétique de la lumière . . . . .	47
CHAPITRE III : LA RECEPTION DES THEORIES DE MAXWELL ET L'ENSEI- GNEMENT SCIENTIFIQUE EN FRANCE . . . . .	55
Section III.1 Les leçons de Mascart au Collège de France . .	58
Section III.2 Les cours de Jamin à l'Ecole Polytechnique . .	74
Section III.3 Les cours de Potier à l'Ecole Polytechnique. .	83

CHAPITRE IV	: L'INSERTION DES THEORIES DE MAXWELL DANS LA RECHERCHE EN FRANCE . . . . .	92
Section	IV.1 <u>Le Traité de Physique Mathématique</u> de E. Mathieu . . . . .	93
Section	IV.2 L.M. Brillouin et son essai d'interprétation mécanique des théories de Maxwell . . . . .	112
CHAPITRE V	: LA PLACE DE L'OUVRAGE <u>ELECTRICITE ET OPTIQUE</u> DE H. POINCARÉ DANS LA RECEPTION DES THEORIES DE MAXWELL <b>EN FRANCE</b> . . . . .	132
Section	V.1 Les fondements épistémologiques de deux lectures du <u>Treatise</u> . . . . .	136
Section	V.2 Les inconsistances de l'électrostatique du <u>Treatise</u> selon Poincaré . . . . .	149
Section	V.3 La comparaison entre les théories des milieux diélectriques de Poisson - Mossotti et de Maxwell . . . . .	171
Section	V.4 Le choix entre les théories de Helmholtz et de Maxwell . . . . .	189
Section	V.5 Aperçu des options théoriques de Poincaré après 1890 . . . . .	213
CHAPITRE VI	: LE CAS DUHEM DANS LA RECEPTION DES THEORIES DE MAXWELL EN FRANCE . . . . .	224
	PREMIERE PARTIE : Maxwell dans les écrits épisté- mologiques et historiographiques de Pierre Duhem . . . . .	225
Section	VI.1 Maxwell comme un enjeu dans les premières ré- flexions épistémologiques de Duhem . . . . .	225
Section	VI.2 Les théories de l'optique et la conception Duhemienne de l'histoire des sciences . . . . .	230

Section VI.3	Maxwell, les explications mécaniques et l'"Ecole Anglaise" . . . . .	237
Section VI.4	Discussion des analyses de Duhem sur la physique anglaise de la deuxième moitié du XIXème siècle . . . . .	246
Section VI.5	Les théories de Maxwell et l'évolution de la mécanique . . . . .	257
	DEUXIEME PARTIE : Duhem, la critique des théories de Maxwell et le programme de Helmholtz . . . . .	263
Section VI.6	La critique de 1894 des théories de Maxwell . . . . .	268
Section VI.7	La théorie de Helmholtz et l'expérience . . . . .	286
Section VI.8	L'ouvrage <u>Les Théories Electriques de J.C. Maxwell</u> . . . . .	296
Section VI.9	Quelques considérations sur le cas Duhem dans la réception des théories de Maxwell . . . . .	334
	CONCLUSION . . . . .	348
	APPENDICE A : POLARISATION DIELECTRIQUE ET THEORIES DE L'ACTION ELECTROSTATIQUE . . . . .	360
	APPENDICE B : LA TRADITION CONTINENTALE EN ELECTRODYNAMIQUE . . . . .	368
	NOTES . . . . .	382
	BIBLIOGRAPHIE . . . . .	431

## I N T R O D U C T I O N

- LA RECEPTION DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES COMME OBJET DE RECHERCHES EN HISTORIOGRAPHIE DES SCIENCES p.1
- LA RECEPTION DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES COMME OUTIL METHODOLOGIQUE EN HISTORIOGRAPHIE DES SCIENCES p.6
- L'OEUVRE DE JAMES CLERK MAXWELL EN ELECTRICITE ET EN MAGNETISME p.8
- REMARQUES SUR LA RECHERCHE DES SOURCES PRIMAIRES p.9

LA RECEPTION DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES COMME  
OBJET DE RECHERCHES EN HISTORIOGRAPHIE DES SCIENCES

Un des traits caractéristiques d'une science qui atteint un certain degré de développement est l'instauration d'un consensus vis-à-vis des objets d'étude, des méthodologies employées et des critères d'évaluation des "produits" de la recherche.

Des auteurs comme Kuhn considèrent le consensus autour d'un seul cadre théorique — le "paradigme" — comme le fondement même de l'activité scientifique "normale" et la condition d'une croissance de la connaissance scientifique. D'après cette théorie de l'histoire des sciences ce "paradigme" est à l'origine d'une tradition de recherches qui acquiert, au fur et à mesure, une certaine inertie caractérisée par la résistance des scientifiques à accepter un changement des éléments du paradigme. En effet Kuhn soutient qu'un changement est potentiellement controversé puisqu'il met souvent en cause certains des éléments du consensus qui, en période "normale", permettent de trancher tout différend. Une série d'"anomalies", comme par exemple des phénomènes qui résistent à une "explication" peut, ainsi, remettre en cause le paradigme et ouvrir une période de "crise" caractérisée par l'absence de consensus autour d'un cadre théorique unique, des méthodologies employées, des critères de "scientificité", etc.

Quand on étudie de plus près un épisode historique on constate que les faits s'accrochent difficilement à cette structure proposée par Kuhn. Ce qui, par ailleurs, est intrinsèque à tout modèle, dans n'importe quelle sphère d'investigation: le modèle est toujours plus "pauvre" que les faits eux-mêmes, car il est le résultat d'un travail d'abstraction, de sélection, de généralisation. Cela constitue en fait, la richesse et la raison d'être du modèle: il crée les conditions de sa propre remise en cause, il met en évidence des "anomalies", il permet de faire avancer la recherche.

Il est difficile de rendre compte du développement dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, de ce que nous appelons de nos jours la

"physique", en s'appuyant sur le modèle proposé par Kuhn.

D'une part nous ne pouvons pas faire état d'une communauté scientifique homogène: au XIX<sup>ème</sup> siècle le consensus était loin d'atteindre l'étendue qu'on lui connaît aujourd'hui.<sup>1</sup> Il existait des communautés relativement autonomes de savants travaillant dans un même domaine, qui utilisaient souvent des méthodologies très différentes. Les produits de cette activité, réglée par des normes distinctes, étaient parfois difficiles à comparer, voire tout à fait "incommensurables".

D'autre part il est difficile de caractériser un "paradigme" unique de la recherche en physique dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. Nous reconnaissons plutôt une pluralité de "paradigmes" différents qui s'avèrent incompatibles. Il a déjà été signalé, pertinemment, que cette pluralité de paradigmes était le moteur même du développement scientifique de cette période, et que leur incompatibilité a déclenché la "crise" de la Physique au début du vingtième siècle.<sup>2</sup>

La non-homogénéité de la "communauté scientifique" dans une certaine époque constitue l'intérêt des cas de "transmission de la science" d'un groupe de savants à un autre travaillant dans un même domaine de recherches.

Nous soutenons que les phénomènes associés aux processus de transmission des résultats de la recherche scientifique sont intrinsèques à la dynamique même de cette recherche. Ces phénomènes commencent à recevoir une attention des historiens des sciences à la mesure de leur importance.

Dolby caractérise trois phases principales dans un processus typique de transmission de la connaissance scientifique.<sup>3</sup> Dans la première phase un savant ou une communauté de savants prend contact ("awareness") avec un "produit" de l'activité scientifique (théorie, résultat expérimental, etc.). Dans la deuxième phase il se manifeste un intérêt pour ce produit. Finalement il peut y avoir l'adoption de la nouveauté, où celle-ci est intégrée dans les recherches du groupe receveur. Dolby étudie différents phénomènes qui peuvent avoir lieu dans un tel processus. Il peut, par exemple, s'y révéler une "résistance" à l'adoption du produit qui est reçu. Dolby discute des quelques facteurs qui peuvent déterminer

une telle résistance :

- 1) le conflit avec une idée ou une pratique admise;
- 2) le conflit avec des normes méthodologiques;
- 3) l'absence de base "empirique" ou de fondement "théorique" de la nouveauté;
- 4) des facteurs "idéologiques" (nationalismes, guerres, etc.).

D'autres phénomènes associés à la "transmission de la science" méritent d'être signalés. L'adoption d'une théorie scientifique par une certaine communauté de savants peut, par exemple, provoquer une modification des normes méthodologiques admises, ou conduire à rejeter une idée qui était jusque là admise. Le processus de transmission peut alors être marqué par des controverses au sein même de la communauté réceptrice. Il se peut, au contraire, que le contenu d'une théorie qui est "transmise" soit changé de façon à ce qu'elle s'adapte au cadre conceptuel et méthodologique du groupe récepteur. Le rythme de transmission d'un certain produit de la recherche peut varier selon la communauté de savants, un phénomène dont l'explication peut conduire à la "découverte" de nouveaux faits historiques.

Récemment diverses études ont été publiées concernant la transmission de théories de la France vers la Grande Bretagne dans la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle.<sup>4</sup>

Il existait alors en France une discipline appelée "physique" qui était en plein essor. On voit effectivement surgir pendant les premières quarante années de ce siècle, en France, des théories fondatrices de la physique mathématique moderne, dans les domaines de l'optique, de l'électricité, du magnétisme, de la mécanique des milieux continus, de la thermodynamique, etc..

Les théories élaborées en France à cette époque, à l'intérieur de traditions de recherche cohérentes, seront transmises vers la Grande Bretagne et assimilées par la tradition britannique de "natural philosophy".

Crosland et Smith ont étudié cet important cas de transmission de la science. Ces auteurs montrent qu'en Grande Bretagne non seulement le cadre institutionnel était différent (la professionnalisation du scientifique était, par exemple, beaucoup moins avancée qu'en France)<sup>5</sup> mais aussi, sur le plan **conceptuel** la tradition de la "natural philosophy" ne délimitait pas, d'une façon stricte, les diverses disciplines. Cette tradition n'avait pas non plus acquis le degré de sophistication mathématique de la recherche en France. Les théories étaient, en Grande Bretagne, beaucoup plus spéculatives, puisqu'il n'existait pas quelque chose d'analogue au paradigme Laplacien en France. Les différences, en Grande Bretagne, entre les traditions existantes, par exemple, en Ecosse et à Cambridge, étaient très marquées, et elles ont joué un rôle essentiel dans l'assimilation de ce qui se faisait en France. En fonction de ces différences, plusieurs développements de la physique française n'ont pas été acceptés outre-Manche, tandis que d'autres ont été assimilés avec changement de contenu. Cette transmission a été déterminante pour l'émergence de la physique en Grande Bretagne au XIX<sup>ème</sup> siècle.

A la fin des années 30, il résulte de ce brassage de traditions trois bases conceptuelles de la recherche en physique mathématique, décrites par Crosland et Smith de la façon suivante :

"The first was the view that all phenomena can be reduced to attractive and repulsive forces (...) following Newton and Laplace. The second was the view that phenomena could be resolved into the components of ether and matter (...) The third view emphasized mathematical law based on observable entities to avoid having to consider underlying entities such as interparticulate forces or ethers..."<sup>6</sup>

Sur ce fondement conceptuel, tout au moins dans une large mesure, la physique britannique a connu un grand essor à partir de années 30.

Pour des raisons pas très bien établies la physique théorique rentre en France, à partir des années 40, dans une phase de relative stagnation qui se prolongera au moins jusqu'aux années 80.<sup>7</sup> La créativité prodigieuse du début du siècle s'estompe. D'exportatrice de produits

théoriques, la France devient importatrice dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. Les théories développées en Grande Bretagne et en Allemagne sont alors transmises vers la France.

Nous voudrions nous pencher sur ce nouveau cycle de transmission dans un domaine limité: celui de l'électricité et du magnétisme.

L'oeuvre de Maxwell en électricité et en magnétisme, notamment sa théorie électromagnétique de la lumière, est universellement reconnue aujourd'hui comme une des contributions les plus significatives au développement de la physique, à côté de celles d'un Galilée, d'un Newton ou d'un Einstein.

Comment ce consensus, qui est celui de la communauté scientifique du XX<sup>e</sup> siècle, s'est construit historiquement ? Que suppose-t-il sur les plans théorique, empirique et épistémologique ?

Cette question est d'un grand intérêt pour l'historien qui cherche à mettre en évidence et à expliquer le développement concret des sciences, ainsi qu'à tous ceux concernés par la structure et la dynamique de ce développement.

Dans ce travail nous essayerons de contribuer à la réponse de cette question en étudiant un cas de transmission de la science: la réception en France des théories de Maxwell en électricité et en magnétisme.

Nous essayerons de déceler la structure de la réception en France des théories de Maxwell dans les domaines cités plus haut: quand ces théories ont-elles été connues en France ? Peut-on caractériser des phases dans cette réception ?

Nous tâcherons de discuter les facteurs qui ont déterminé cette structure: l'existence éventuelle de théories admises concurrentes; la normativité méthodologique qui prédominait dans chaque phase de la réception; les sources épistémologiques tacites ou explicites de cette normativité.

Finalement nous essayerons de détecter, d'un côté la forme sous laquelle les théories de Maxwell ont été finalement adoptées. De l'autre côté, nous chercherons à déterminer l'influence éventuelle que la réception des théories de Maxwell a pu avoir sur le cadre conceptuel de la recherche en France de la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle.

LA RECEPTION DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES COMME  
OUTIL METHODOLOGIQUE EN HISTORIOGRAPHIE DES SCIENCES

Nous croyons pouvoir distinguer à un niveau historiographique, deux dimensions de la recherche sur la réception d'une théorie scientifique.

Cette réception peut être considérée comme un objet de recherche historiographique. Nous avons introduit cette première dimension dans ce qui précède.

Nous avons vu que l'étude d'un cas de réception conduit naturellement à mettre en évidence la base consensuelle qui règle la production scientifique d'une certaine communauté de savants dans une période déterminée. Les résultats de cette étude peuvent alors être utilisés, d'une façon systématique, comme un outil méthodologique en historiographie des sciences, visant à faire ressortir cette base consensuelle en général tacite.

Nous soutenons que l'étude de la réception d'une théorie scientifique peut également conduire à une meilleure compréhension de cette théorie elle-même.

Nous avons exploré cette autre dimension dans nos recherches sur la réception en France des théories de Maxwell en électricité et en magnétisme.

Ce travail peut ainsi être considéré comme une étude de la communauté scientifique française de la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle .

Nous avons entrepris souvent des enquêtes pour situer tel ou tel savant à l'intérieur de cette communauté. Il a été important, parfois, de caractériser les parti pris méthodologiques ou l'épistémologie explicite d'un savant, pour mieux comprendre certains faits en rapport avec la réception des théories de Maxwell.

Comme notre étude couvre une période assez longue, nous avons également mis en évidence des changements dans les éléments consensuels de la communauté scientifique française, comme des effets, en partie, de l'adoption des théories de Maxwell.

Nous avons aussi été amenés à mettre en évidence les principaux programmes de recherche dans lesquels s'étaient engagés les savants français dans les domaines de l'électricité, du magnétisme et de l'optique, dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Ce travail peut également être considéré comme une étude de l'oeuvre de Maxwell en électricité et magnétisme. L'étude de la réception d'une théorie scientifique suit, effectivement, différents parcours, analyse diverses approches de cette théorie elle-même, qui émerge comme résultat d'une multitude d'éclairages.

Initialement nous avons envisagé une présentation de l'oeuvre de Maxwell précédant l'étude de sa réception en France. Nous avons abandonné ce projet qui, par sa complexité et son étendue risquerait de nous éloigner de l'objet central de ce travail. Cette structure masquerait, en plus, une des dimensions de l'étude de la réception d'une théorie scientifique: la pluralité de regards, de lectures, d'approches. Dans une oeuvre aussi riche et multiforme que celle de Maxwell, c'est un grand avantage de pouvoir la parcourir de plusieurs façons. Nous verrons que chacune des sources qui seront analysées dans ce travail sillonne cette oeuvre d'une façon particulière, certains de ses aspects étant mis en avant, d'autres rejetés ou ignorés. Nous croyons que ces multiples lectures aideront à mieux saisir l'originalité de cette oeuvre.

L'OEUVRE DE JAMES CLERK MAXWELL EN ELECTRICITE  
ET EN MAGNETISME

L'intérêt que présente l'oeuvre de Maxwell en électricité et magnétisme ne se mesure pas uniquement à quelques uns de ses accomplissements théoriques, autour desquels a pu s'instaurer un consensus à l'intérieur de la communauté scientifique.

Elle est aussi le registre splendide d'un effort de création scientifique qui n'occulte pas son cheminement et ses tâtonnements. Maxwell était conscient qu'il s'engageait dans une entreprise théorique originale qui exigeait une réflexion permanente sur les choix méthodologiques et sur les instruments conceptuels disponibles ou en élaboration.

Si le Treatise on Electricity and Magnetism est le couronnement de deux décades de recherches et contient la forme la plus élaborée des théories de Maxwell, ou ne peut pas dire, pour autant, que cet ouvrage est le produit d'une accumulation continue, d'une sommation de résultats obtenus dans les mémoires qui le précèdent. L'oeuvre de Maxwell a une indéniable unité, grâce à une perspective de base qui l'inspire, mais elle présente des clivages conceptuels profonds et constitue un prodigieux exercice de pluralisme méthodologique.

L'oeuvre de Maxwell en électricité et magnétisme est composée essentiellement de quatre mémoires et deux traités<sup>8</sup> :

- 1- "On Faraday's Lines of Force" (1855/6)
- 2- "On Physical Lines of Force" (1861/2)
- 3- "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" (1864)
- 4- "On a Method of Making a Direct Comparison of Electrostatic with Electromagnetic Force; with a Note on the Electromagnetic Theory of Light" (1868)

5- A Treatise on Electricity and Magnetism

1.ed. (1873)

2 ed. (1881)

6- Elementary Treatise on Electricity (1881)

On ne peut pas rendre compte de la richesse de l'entreprise théorique de Maxwell sans la suivre dans toutes ses étapes.

Nous n'avons pas la prétention ici d'accomplir cette tâche qui constituerait, à elle seule, l'objet d'une thèse. Elle dépasserait en plus le cadre de ce travail et nous éloignerait de nos objectifs.

Nous allons admettre la connaissance de cette oeuvre. Nous discuterons toujours d'un aspect de l'oeuvre de Maxwell sous l'éclairage particulier de sa réception.

Nous croyons toutefois, comme il a déjà été signalé, qu'il se dégagera de cette étude une vision globale de cette oeuvre, comme résultat des nombreuses lectures entreprises par les savants français du XIX<sup>ème</sup> siècle.

REMARQUES SUR LA RECHERCHE DES SOURCES PRIMAIRES

A notre connaissance le développement de la physique en France dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle n'a pas été l'objet de nombreuses études de la part d'historiens des sciences. A quelques exceptions près, le terrain est complètement vierge, contrairement à la première moitié du siècle qui a été abondamment **couverte**.

Cette situation est sans doute stimulante pour l'historien qui veut entreprendre des recherches sur cette période, mais elle est aussi à la mesure des difficultés qu'il va rencontrer en l'absence des sources.

bibliographiques facilement disponibles . Des renseignements aussi primaires que ceux qui se rapportent à la composition de la communauté scientifique de l'époque, manquent. En particulier pour la période qui s'écoule de 1850 à 1880, nous nous sommes heurtés à une totale absence de renseignements de départ.

Le Royal Society Catalogue of Scientific Papers 1800-1900 a été la source bibliographique qui nous a permis de faire un premier dépouillement. D'une grande aide ont été aussi les tables des Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, le Biographisch-Literrarisches Handwörterbuch zur Geschichte der exacten Wissenschaften de J. C. Poggendorff et les Catalogues de la Bibliothèque Nationale et de la Bibliothèque de la Sorbonne.

Nous avons aussi dépouillé plus ou moins systématiquement les revues: Annales de Chimie et de Physique; Revue Scientifique; Journal de Physique Théorique et Appliquée; Revue des Cours Scientifiques de la France et de l'étranger; Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées; La Lumière Electrique; Revue des Questions Scientifiques; L'Eclairage Electrique; Journal des Savants.

Pour les biographies des savants nous avons utilisé le Dictionary of Scientific Biography ( C.C. Gillispie, ed.), et le World Who's Who in Science (Allen G. Debus, ed.). Ces sources biographiques ont souvent été insuffisantes, ce qui nous a obligé, dans nombreux cas, à consulter des essais biographiques et des notices nécrologiques publiés dans des revues françaises.

## C H A P I T R E I

### LE DEBUT DE LA RECEPTION EN FRANCE DES THEORIES DE MAXWELL EN ELECTRICITE ET EN MAGNETISME

-----

SECTION I.1- QUAND LES THEORIES DE MAXWELL ONT-ELLES ETE CONNUES EN FRANCE ? LE CAS EMILE VERDET	p.11
- Observation sur la méthodologie de E. Verdet	p.19
SECTION I.2- CHRONOLOGIE DE LA RECEPTION EN FRANCE DES THEORIES DE J.C. MAXWELL EN ELECTRICITE ET EN MAGNETISME	p.23

SECTION I.1- QUAND LES THEORIES DE MAXWELL ONT-ELLES ETE  
CONNUES EN FRANCE ? LE CAS EMILE VERDET

Il y a un personnage clef pour l'historiographie de la réception en France des recherches en physique effectuées à l'étranger pendant les années cinquante et soixante du XIX<sup>ème</sup> siècle : Emile Verdet.<sup>9</sup>

Tous les biographes de Verdet (1824/1866) font état d'un travail exceptionnel réalisé par ce physicien pour divulguer en France l'activité scientifique étrangère. Les traces de ce travail nous sont parvenues notamment par l'intermédiaire d'une série de comptes-rendus analytiques de travaux scientifiques publiés à l'étranger, parus entre 1852 et 1864 dans les Annales de Chimie et de Physique.

De la Rive, dans sa biographie de Verdet incluse dans l'édition des Oeuvres de ce savant, souligne l'importance de cette série de comptes-rendus :

" 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".<sup>10</sup>

De la Rive fait ressortir particulièrement le rôle crucial joué par Verdet dans la divulgation en France de la théorie mécanique de la chaleur.<sup>11</sup>

Frankel<sup>12</sup> et Levistal<sup>13</sup> mettent également en évidence le travail de divulgation de Verdet au sein de la communauté scientifique française de l'époque qui était, vraisemblablement, dans l'ignorance de ce qui se réalisait à l'étranger. Le dernier biographe affirme sur cet état de choses :

"Dès 1852, frappé du peu de retentissement que les travaux accomplis en dehors de notre pays par des savants distingués et même illustres avaient souvent chez nous, jaloux de maintenir le niveau scientifique de la France, qu'il craignait de voir s'abaisser par suite de cet isolement, il s'était voué à une tâche ardue, mais que lui facilitait la parfaite entente des principales langues étrangères".

L'influence de Verdet ne se limitait pas à cette tâche de divulguer. Il a eu une intense activité comme enseignant à l'Ecole Normale Supérieure, à l'Ecole Polytechnique et à la Faculté des Sciences de Paris. Nous verrons aussi, plus bas, l'importance de ses recherches expérimentales, particulièrement sur le phénomène de rotation magnétique de la lumière polarisée.

Dans ce milieu de siècle en France un regard retrospectif ne peut désigner que quelques physiciens d'importance, et le nom de Verdet occupe, sûrement, une place distinguée.<sup>14</sup>

Les biographes de Verdet signalent son grand intérêt pour l'Optique théorique et pour les rapports entre les phénomènes lumineux et magnétiques.

Il nous a semblé donc naturel de chercher du côté de Verdet d'éventuels échos en France, de la publication des premiers mémoires de Maxwell. Nous avons alors regardé, premièrement, l'ensemble de ses Comptes Rendus de travaux scientifiques publiés à l'étranger. Il est déconcertant de ne pas trouver un seul qui se réfère aux mémoires FA et PH, qui ont été pourtant publiés dans la période de parution de cette série de Comptes-Rendus. Cela nous a semblé d'autant plus étonnant que Verdet suivait de près le Philosophical Magazine, où a été publié le mémoire PH (dans le volume XXI de la 4<sup>ème</sup> série). Ainsi, parmi les comptes-rendus parus dans le volume 61 des Annales de Chimie et de Physique de l'année 1861, l'un d'entre eux est consacré au mémoire de Grove qui avait été publié dans le volume XX du Phil. Mag. Il ne peut donc pas y avoir de doute: Verdet a eu sous les yeux au moins le mémoire PH de Maxwell, et cela dès sa parution en 1861/2.

Cependant, il faut attendre 1863 pour trouver une référence de Verdet à ce mémoire, et cela dans un cadre bien précis: celui des ses re-

cherches expérimentales sur le phénomène de rotation magnétique du plan de la lumière polarisée.

Ces recherches<sup>15</sup> de Verdet ont été décrites dans quatre mémoires entre 1854 et 1863. Dans le dernier Verdet compare les résultats auxquels il est parvenu avec les prévisions des diverses théories de la lumière, dont celle que Maxwell avait développée dans son deuxième mémoire.

Nous essayerons par la suite de présenter les enjeux du quatrième mémoire de Verdet, surtout en ce qui concerne l'interface expérience/théorie. Dès son deuxième mémoire il se déclare concerné par cette confrontation :

"L'intérêt de cette recherche n'a pas besoin d'être signalé: il est évident qu'elle doit précéder toute discussion des théories qui ont été ou qui pourront être proposées pour l'explication des phénomènes".<sup>16</sup>

Il ne se livre toutefois pas encore à cette discussion. Ce sera l'enjeu du quatrième mémoire.

Dans le dernier volet de ses recherches Verdet essaie de déceler un rapport éventuel entre le phénomène de rotation magnétique et une propriété du rayon lumineux, comme la longueur d'onde (et non pas entre ce phénomène et une propriété du milieu où le rayon se déplace, ce qui avait fait objet d'une investigation dans le mémoire antérieur). Biot avait auparavant mis en évidence un rapport du type recherché par Verdet, pour le cas des substances qui ont un pouvoir naturel de faire tourner le plan de la lumière polarisée. E. Becquerel et Wiedemann avaient également publié des résultats sur le rapport qui concerne Verdet, mais celui-ci doutait de la précision de leurs expériences.

Il a donc décidé de reprendre la question. Les implications de cette recherche vis à vis des tentatives de théorisation du phénomène étaient sa motivation première :

"... si la dispersion des plans de polarisation était soumise à quelque loi simple et générale, il serait possible d'en déduire la forme que prennent les équations différentielles du

mouvement de l'éther, lorsque le corps où il est contenu est influencé par les force magnétiques; j'espérais ainsi faire avec sûreté un premier pas dans la voie qui peut mener à découvrir la théorie des phénomènes".<sup>17</sup>

Il a résumé les résultats de ses expériences en deux points:

- "1° - La dispersion des plans de polarisation des rayons de diverses couleurs, sous l'influence des forces magnétiques, se fait APROXIMATIVEMENT, suivant la loi de la raison réciproque des carrés des longueurs d'ondulation;
- 2° - La loi exacte de dispersion, spéciale à une substance donnée, est toujours telle que le produit de la rotation par le carré de la longueur d'onde  $[\lambda]$  en croissant de l'extrémité la moins réfrangible à l'extrémité la plus réfrangible du spectre".<sup>18</sup>

Dans la quatrième partie du mémoire Verdet applique ces résultats à la discussion des théories de la lumière.

Airy avait proposé d'ajouter aux équations différentielles pour le mouvement de l'éther dans un corps isotrope, certains termes de façon à les rendre compatibles avec le phénomène de rotation magnétique qui venait d'être découvert par Faraday. Pour cela il a modifié les équations que MacCullagh avait proposées pour les corps qui produisent naturellement la rotation, étant donné une différence essentielle entre celle-ci et la rotation magnétique.<sup>19</sup> Airy n'a donné aucune justification mécanique à ces équations. Les termes introduits devraient être proportionnels à la dérivée première par rapport au temps des déplacements qui sont perpendiculaires à la coordonnée considérée. Si l'on considère le cas d'une onde plane qui se propage selon "z", les nouvelles équations auraient la forme :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \xi}{dt^2} &= A \frac{d^2 \xi}{dz^2} + m \frac{d\eta}{dt} \\ \frac{d^2 \eta}{dt^2} &= A \frac{d^2 \eta}{dz^2} - m \frac{d\xi}{dt} \end{aligned} \right\} \text{(I)}$$

où  $\xi$  et  $\eta$  sont, respectivement, les déplacements d'une molécule de l'éther dans les directions  $x$  et  $y$ .  $A$  est égal au carré de la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu, et  $m$  serait proportionnel à la composante de l'action magnétique parallèle au rayon lumineux.

Mais Airy a lui-même mis en évidence que des dérivées d'ordre impair supérieures à celles introduites (deuxième terme du membre droit des équations (I)) pourraient rendre compte aussi bien du phénomène découvert par Faraday. Verdet a donc voulu faire appel à l'expérience pour décider parmi ces possibilités, "à défaut d'une vraie théorie mécanique", dit-il.<sup>20</sup>

Verdet montre alors que les équations (I) sont incompatibles avec toute tentative de rendre compte de la dispersion observée dans le phénomène de rotation magnétique (voir, plus haut, les premiers résultats de ses expériences).

Verdet élimine de cette façon la théorie proposée par C. Neumann en 1863, à partir de la loi électrodynamique de Weber.<sup>21</sup> D'après cette théorie, comme nous la décrit Verdet, "dans l'intérieur d'un corps transparent soumis à l'action du magnétisme, une molécule d'éther en mouvement est sollicitée non seulement par les forces qui agissent ordinairement sur elle, mais encore par la résultante des actions des molécules électriques composant les courants moléculaires situés à très petite distance".<sup>22</sup>

Cette action entre "molécules du fluide électrique" et "molécules de l'éther" dépendrait de la vitesse relative de ces deux molécules, de la même façon que l'action supposée par Weber entre particules électriques. La magnétisation serait le résultat de courants moléculaires.

Neumann a aussi cru pouvoir rendre compte des résultats expérimentaux obtenus par Verdet dans son 3<sup>ème</sup> mémoire en supposant, comme Weber, que les propriétés magnétiques et diamagnétiques des corps seraient

expliquées par le sens des courants électriques moléculaires.

Verdet avoue avoir eu des idées semblables à celles de Neumann "dès le début" de ses recherches. Ces idées lui ont "fait prévoir à l'avance les lois démontrées dans mes deux premiers mémoires". Il avait cependant décidé de ne pas publier ces idées "avant d'en avoir obtenu de nouvelles et plus décisives confirmations". Celle-ci a été, d'après lui, la "voie réelle" de ses recherches.<sup>23</sup>

La théorie de Neumann, qui a comme conséquence les équations (I), est donc rejetée par Verdet dans son quatrième mémoire.

La loi de la raison réciproque du carré des longueurs d'onde serait, par contre, compatible soit avec le système d'équations:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \xi}{dt^2} &= A \frac{d^2 \xi}{dz^2} + m \frac{d^3 \eta}{dz^2 dt} \\ \frac{d^2 \eta}{dt^2} &= A \frac{d^2 \eta}{dz^2} - m \frac{d^3 \xi}{dz^2 dt} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II})$$

soit avec le système :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \xi}{dt^2} &= A \frac{d^2 \xi}{dz^2} + m \frac{d^3 \eta}{dt^3} \\ \frac{d^2 \eta}{dt^2} &= A \frac{d^2 \eta}{dz^2} - m \frac{d^3 \xi}{dt^3} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III})$$

Verdet montre, toutefois, que les systèmes d'équations (I), (II), et (III) ne sont pas conformes au deuxième résultat des expériences de ce mémoire. (voir plus haut).

Dans la quatrième partie du mémoire PH Maxwell applique sa théorie des vortices moléculaires au phénomène de rotation magnétique de la lumière polarisée et il obtient des équations de la forme (II).<sup>24</sup>

Maxwell mentionne, par ailleurs, explicitement les expériences de Verdet qui auraient selon lui mis en évidence les propriétés singulières de la rotation magnétique, par rapport à la rotation produite naturellement par certaines substances. La théorie proposée dans le mémoire PH suppose que le milieu est le siège des phénomènes magnétiques et qu'il comporte des rotations dans ses parties élémentaires, qui auraient une influence sur la propagation de la lumière:

"... if the medium be in a state of rotation, either as a whole or in molecular vortices, the circular vibrations of light may differ in velocity according as their direction is similar or contrary to that of the vortices".<sup>25</sup>

Verdet fait état de cette théorie à la fin de son quatrième mémoire. Il présente alors la théorie des vortices moléculaires de Maxwell en ces termes :

"Son hypothèse consiste à admettre qu'il existe, dans tout espace placé sous l'action des forces magnétiques, un nombre immense de petits TOURBILLONS MOLECULAIRES, dont les axes coïncident partout avec la direction des forces magnétiques et qui développent par leur action centrifuge des pressions propres à rendre compte des phénomènes magnétiques et électromagnétiques. Ces tourbillons sont renfermés dans des espèces de cellules dont les parois sont composés de molécules très petites par rapport aux molécules des tourbillons; c'est par l'intermédiaire de ces molécules que le mouvement se communique d'un tourbillon à un autre. Les molécules intermédiaires ne sont autre chose que le fluide électrique, leur mouvement constitue les courants, l'impulsion tangentielle qu'elles reçoivent des tourbillons voisins est la force électromotrice. Enfin, la matière même des tourbillons est l'éther lumineux, et les équations (II) s'obtiennent en considérant des ondes planes qui se propagent dans un milieu divisé en tourbillons moléculaires, sous l'influence d'aimants ou de courants électriques".<sup>26</sup>

Ceci est très probablement le premier compte-rendu en France —

si petit qu'il soit - d'une théorie de Maxwell en électricité et magnétisme.

C'est donc par le biais de l'application de la première version de sa théorie électromagnétique de la lumière au phénomène de rotation magnétique que ses théories se sont faites connaître. Mais Verdet va offrir, par la suite, une première "falsification" de la théorie électromagnétique de la lumière appliquée au phénomène de rotation magnétique.

Or, Verdet soutient que les équations (II), ainsi que les équations (III), ne sont pas conformes au deuxième résultat de ses expériences, qui concerne le phénomène de dispersion associé à la rotation magnétique. En particulier les équations (II), prévues par Maxwell, et que Verdet a crues dans un premier moment être compatibles avec les résultats de ses expériences,<sup>27</sup> ne rendent pas compte selon lui de la dispersion observée dans certaines substances:

"Les expériences nouvelles sur le sulfure de carbone et la créosote montrent qu'on ne peut regarder aucun des deux systèmes comme suffisant".<sup>28</sup>

Verdet montre en effet que les équations de type (II) conduisent à une des lois suivantes pour le pouvoir de rotation magnétique  $\rho$  :

$$\rho = \frac{4\pi^2 m}{V} \frac{n^2}{\lambda^2} \left( n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad \text{ou}$$

$$\rho = \frac{4\pi^2 m V}{\lambda^2} \left( n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right)$$

où  $V$  est la vitesse de la lumière dans le vide,  $\lambda$  est la longueur d'onde dans le vide et  $n$  est l'indice de réfraction de la substance.

Une comparaison entre ces prévisions théoriques et les résultats de ses expériences, conduit Verdet à affirmer que les premières n'ont pas "le caractère d'une loi générale"<sup>29</sup> et que, donc, les théories à partir desquelles elles sont déduites ne peuvent pas être retenues.

Verdet a repris l'ensemble de cette trajectoire expérimentale dans les Conférences qu'il a données à l'Ecole Normale Supérieure, et publiées en 1872 dans le vol. IV (partie 2) de son oeuvre, par le soin d'un de ses élèves. L'éditeur a ajouté au texte une bibliographie sur chaque sujet traité par Verdet. Nous croyons pouvoir déduire que cette bibliographie a été faite vers 1872.

Nous sommes frappés de ne pas y trouver de référence au mémoire PH ou à un autre quelconque mémoire de Maxwell. Et dans cette bibliographie figurent des travaux publiés jusqu'en 1870. Cela est d'autant plus étonnant qu'on y trouve également des mémoires comme celui de Neumann, qui sont des tentatives de théorisation du phénomène de rotation magnétique.

Nous **croyons** donc pouvoir conclure que jusqu'au début des années 70 les travaux en électricité et magnétisme de Maxwell étaient à peine connus et n'ont pas éveillé un intérêt particulier. Nous verrons que la publication du Treatise en 1873 va un peu infléchir cette situation.

#### Observations sur la Méthodologie de E. Verdet

La minutie avec laquelle nous avons décrit le contexte dans lequel Verdet fait référence à Maxwell serait sûrement excessive, si nous nous limitons au seul repérage chronologique d'une première prise de contact de la communauté scientifique française avec les théories de ce savant.

Cependant, nous avons aussi pour but de mettre en évidence une éventuelle grille méthodologique qui aurait pu, au moins en partie, déterminer une sensibilité particulière de la communauté scientifique française du milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle aux premiers mémoires de Maxwell.

Les recherches de Verdet sur la rotation magnétique de la lumière polarisée constituent sa contribution la plus importante à la

physique. Elles nous semblent donc assez significatives pour que nous essayons d'entreprendre ce type de lecture.

Nous voyons dans ce cycle de recherches deux éléments qui semblent refléter une certaine conception de la dynamique scientifique chez Verdet. La démarche de ce savant révèle, par exemple, une valorisation extrême de l'expérience comme "instance" décisive de jugement des théories physiques, ainsi qu'une méfiance à l'égard d'hypothèses non encore soumises à cette "instance".

L'objectif avoué de Verdet, dès le début de ses recherches expérimentales, est de tester les théories de la lumière. Nous le voyons alors au bout de cette trajectoire, rejeter sans parcimonie les théories scientifiques qui ne concordent pas avec les résultats de ses expériences.

Son souci d'éviter toute considération théorique avant que l'expérience ait fourni suffisamment de résultats est tout aussi caractéristique. Même en avouant le rôle phare de l'électrodynamique de Weber tout au long de ses recherches, Verdet attend son dernier mémoire pour y faire référence.

Ces deux traits de la méthodologie adoptée par Verdet ont été relevés par son biographe De La Rive :

"Bien souvent Verdet osait s'aventurer dans le champ de l'hypothèse, mais sa droiture et sa haute intelligence l'empechaient de s'abandonner, aussi bien en philosophie qu'en physique, à des théories dont le raisonnement et les faits venaient lui démontrer la faiblesse".<sup>30</sup>

Il continue plus loin :

"Ni matérialiste ni panthéiste, ni positiviste à aucun degré que ce soit, Verdet était tout simplement de cette grande école expérimentale qui représente, non pas un système sur l'origine des choses, mais la recherche sincère, l'esprit libre et vivant de la science".<sup>31</sup>

Nous nous permettons encore de compléter le portrait que nous esquisse De La Rive :

"Verdet appartenait à cette classe de physiciens qui, formé à l'école sévère des méthodes mathématiques et d'une forte érudition scientifique, n'aiment pas s'aventurer dans les sentiers perdus de la science. Et cependant, pour faire de ces découvertes brillantes qui font date en ouvrant des horizons tout nouveaux à la science, il faut tenter ce qui, aux yeux des savants consommés et érudits, semble souvent impossible (...) Verdet était d'une autre école; aussi ne doit-on pas s'étonner que, malgré une grande perspicacité et une appréciation très-fine de la vérité scientifique, il n'ait attaché son nom à aucune de ces découvertes inattendues qui jettent la perturbation dans la science".<sup>32</sup>

Verdet a donc dû être particulièrement prudent avant de se prononcer sur les théories du mémoire PH de Maxwell, étant donné leur caractère hautement hypothétique. Maxwell lui-même a considéré que les résultats de ce mémoire, en particulier ceux qui touchent l'optique, reposaient sur des hypothèses douteuses comme celle de l'existence de particules séparant les cellules du milieu électromagnétique. Verdet a probablement vu dans les résultats de ses expériences, une façon de contrôler la seule conséquence optique testable du mémoire de Maxwell, en rapport avec la rotation magnétique de la lumière polarisée. Nous rappelons, en effet, qu'on ne peut parler d'une théorie électromagnétique de la lumière chez Maxwell qu'à partir de son troisième mémoire, datant de 1864.

Il est, finalement, soutenable que le projet d'une théorie électromagnétique de la lumière ne devait pas attirer Verdet d'une façon particulière, étant donné son attachement au programme de théories éther-élastiques de la lumière. L'admiration de Verdet pour Fresnel est éclatante dans son introduction aux Oeuvres de ce savant. Les cours de Verdet d'Optique Théorique ne concernent, évidemment, que les théories éther-élastiques de la lumière.

En plus, les conséquences optiques du mémoire PH se fondaient sur une théorie singulière des phénomènes électriques et magnétiques, qui supposait un cadre conceptuel complètement étranger aux théories continentales. Or, nous avons vu que Verdet adoptait, en particulier, l'électrodynamique de Weber.

Il n'est pas étonnant non plus, que le premier mémoire de Maxwell, datant de 1855/6, soit passé largement inaperçu en France.

L'option qui y était choisie en faveur de l'approche de Faraday ne pouvait pas s'imposer d'une façon universelle. Adopter la perspective d'une explication des phénomènes en supposant que l'action se transmet de façon contigüe relevait d'un parti pris "métaphysique", que sa profession de foi en faveur des avantages d'un pluralisme méthodologique ne suffisait pas à légitimer. Par ailleurs, Maxwell ne prétendait pas avec ce mémoire établir une "théorie", mais simplement donner un "corps mathématique" à certaines idées de Faraday. Sa théorie de l'"état électrotonique" était "mathématique" et non "physique". Il a fait même allusion, dans ce mémoire, à l'existence d'une "véritable théorie physique" des phénomènes électrodynamiques: celle due à Weber (tout en signalant les objections qui pésaient sur elle et son "droit" à chercher dans une autre direction).

Dans la prochaine section nous apporterons de nouveaux éléments qui vont consolider l'accueil des théories de Maxwell en électricité et en magnétisme chez Verdet comme caractéristique d'une "pré-histoire" de la réception en France de ces théories.

SECTION I.2- CHRONOLOGIE DE LA RECEPTION EN FRANCE DES  
THEORIES DE J.C. MAXWELL EN ELECTRICITE  
ET EN MAGNETISME

Le tableau chronologique que nous allons tracer ici de la réception en France des théories de Maxwell en électricité et magnétisme n'a nullement la prétention d'être complet. Comme dans tout travail de recherche historique, nous nous appuyons sur les sources primaires disponibles, et nous essayons, à partir de celles-ci, de faire quelques généralisations.

Nous avons avancé, dans la section précédente, des arguments visant à établir que les théories de Maxwell étaient méconnues en France à la fin des années 60. Dans le prochain chapitre nous examinerons deux réactions à la publication du Treatise de Maxwell, datant de 1873. Ce sont, de toute évidence, les premiers comptes rendus, en France, des fondements de l'entreprise Maxwellienne. Nous les considérons comme marquant le début de l'histoire de la réception des théories du savant écossais.

Nous pouvons avoir une idée de la chronologie de cette réception à travers les dates de publication, en France, de l'oeuvre de Maxwell. Le premier écrit dont nous avons connaissance date de 1871: "Rapport des sciences physiques avec les mathématiques".<sup>33</sup> Ensuite nous signalons la publication en 1873 du mémoire "L'action à distance".<sup>34</sup> Il est curieux de rapprocher cette publication de l'article de J. Bertrand que nous analyserons dans le prochain chapitre, et qui consiste essentiellement dans une critique de la conception d'action médiatisée et contigüe que Maxwell y soutient. Dans cette même année est publié l'article "Les molécules des corps".<sup>35</sup>

A notre connaissance aucun des trois premiers mémoires de Maxwell en électricité et magnétisme n'a été traduit en français. Nous n'avons pas pu trouver, dans la littérature spécialisée, d'analyses ou de comptes rendus de ces mémoires (à part la référence sommaire de Verdet au mémoire PH et une autre de J. Bertrand au mémoire DT, que nous rapportons dans le prochain chapitre).

La première traduction française d'un travail important de Maxwell date de 1884: son Elementary Treatise (la 1<sup>ère</sup> édition fut publiée en 1881).<sup>36</sup> Les circonstances de cette traduction sont surprenantes. D'abord elle antécède celle du grand Traité de Maxwell, parue l'année d'après. En plus le Traité Elementaire d'Electricité a été traduit par un ingénieur, Gustave RICHARD, et préfacé par lui (et non pas par un physicien, comme on pourrait s'y attendre). Après mettre l'accent notamment sur les applications technologiques de l'électricité et du magnétisme, le traducteur justifie son initiative de la façon suivante :

"Les travaux de Maxwell ont acquis une juste célébrité; mais la lecture de ses Mémoires, pleins d'aperçus originaux, n'est pas sans offrir quelques difficultés aux personnes qui ne sont pas initiées à cette manière de traiter la question. Maxwell a laissé un Ouvrage élémentaire qui peut servir d'introduction à la lecture de ses Mémoires ou du Traité Complet d'Electricité et de Magnétisme".

Il n'y a aucune tentative d'analyse critique des idées de Maxwell, comme sera le cas pour la traduction du grand Traité.

Nous sommes tentés de voir dans cette traduction l'évidence d'une plus importante pénétration des conceptions de Maxwell dans les milieux d'ingénieurs et de techniciens que dans le milieu de physiciens. Comment ne pas songer à ce passage de Poincaré où il met en évidence, retrospectivement, les différentes sensibilités de ces deux milieux au "langage" de Maxwell:

"... les progrès de l'électrotechnique ont exercé sur le développement de la théorie une influence qu'on ne saurait contester. Dans le premier tiers du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'électrostatique était le noyau de la science, l'électrodynamique naissait à peine; et cet état de chose avait son reflet dans les idées théoriques; les actions à distance régnaient sans conteste. Quand l'électrodynamique s'est développée, l'électrostatique a conservé la prééminence due à son ancienneté, les savants purs ont continué à penser en électrostaticiens. Mais il ne pouvait en être de même des techniciens; ceux-ci n'avaient besoin que des courants et l'électrostatique n'était à leurs yeux qu'un art d'agrément; ils n'avaient guère le temps de l'apprendre et ils devaient courir au plus pressé; il

leur fallait une vue directe des phénomènes électrodynamiques, et non pas les regarder pour ainsi dire à travers l'électrostatique. Ils ont donc adopté un langage spécial où les champs, les flux de force, les lignes de force, jouent le rôle prépondérant; à la vérité ils ne l'ont pas inventé tout entier mais il leur convient tellement qu'ils l'auraient peut être créé spontanément si le génie de Faraday ne les avait devancés. (...) Or ce mot de flux à lui seul implique toute la théorie de Maxwell; si le flux intervient seul, et si son action est la même quelle qu'en soit l'origine, il faut admettre l'unité de la force électrique; on ne peut concevoir que des courants fermés, et toute la doctrine de Maxwell en découle par une conséquence forcée. On m'objectera peut-être que, du temps de Maxwell, l'électrotechnique n'était pas aussi développée qu'aujourd'hui. C'est vrai, mais aussi Maxwell n'a pas été compris tout de suite, et puis au bout de vingt ans, on s'est aperçu qu'on comprenait facilement ce qui d'abord avait paru inintelligible et même contradictoire. C'est que les habitudes de langage et d'esprit s'étaient peu à peu modifiées ...".<sup>37</sup>

Il se peut que Poincaré soit victime, dans cette appréciation, d'une certaine illusion retrospective, comme il a été suggéré par Cazenobe, qui cite ce même passage.<sup>38</sup> Nous soupçonnons, toutefois, qu'elle puisse réellement refléter des sensibilités différentes, dont la traduction du Traité élémentaire de Maxwell serait une évidence. Dans ce contexte la traduction en 1881, par un professeur de l'Ecole Supérieure de Télégraphie,<sup>39</sup> de l'ouvrage Traité Experimental d'Electricité et de Magnétisme de J. E. H. Gordon, est significative. Cet auteur, qui a essayé de tester la théorie de Maxwell dans le laboratoire Cavendish<sup>40</sup>, expose dans cet ouvrage les idées de ce savant et consacre une large place aux procédés expérimentaux et aux applications pratiques.<sup>41</sup> Cet ouvrage a probablement porté à la connaissance d'un public élargi, les théories de Maxwell en électricité et magnétisme.

Nous n'avons pas exploré, dans ce travail, cette "filière technique" dans la réception des théories du savant écossais, mais elle nous semble très prometteuse.

Le grand Traité de Maxwell n'est traduit en français qu'en 1885, pour le premier volume, et en 1887 pour le deuxième volume.<sup>42</sup> Cette traduction est annotée par Potier, Sarrau et Cornu. A part certaines

notes qui présentent un intérêt relatif, elles traitent, en général, des questions de détail et non pas des fondements conceptuels de l'ouvrage.

Nous verrons, dans la suite de ce travail, que les théories de Maxwell en électricité et magnétisme ne commencent à être largement discutées en France qu'à partir de la fin des années 80.

La notice nécrologique sur Maxwell publiée en 1879 dans la Revue Scientifique, se limite à fournir une sommaire biographie de ce savant, sans faire aucun commentaire sur ses contributions scientifiques. Les mémoires FA et DT sont simplement cités et il n'y a aucune référence au grand Traité. A la fin de la notice l'auteur mentionne que Maxwell a été membre des "principales sociétés scientifiques d'Europe et d'Amerique...", mais il n'y figure aucune société française. En effet Maxwell n'a même pas été un membre correspondant de l'Académie des Sciences, ce qui constitue une preuve additionnelle que son oeuvre n'a pas été reconnue, de son vivant, comme une contribution majeure au développement de la physique. Cette appréciation ne se fera que restrospectivement, à la lumière des développements auxquels ses théories ont donné naissance.

La phase de la diffusion des théories de Maxwell commence vers la date de publication du Treatise (1873) et atteint un sommet au début des années 80, quand elles ont été introduites dans l'enseignement supérieur en France.

Il faudra, toutefois, attendre la fin de cette décennie pour les voir soumises à une critique et assimilées dans un programme de recherches, ce qui ouvre une nouvelle phase de la réception de ces théories en France. Nous verrons, par ailleurs, que cette phase, aussi tardive, va toutefois s'étendre sur toute la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et sera encore marquée par des événements significatifs au début du XX<sup>ème</sup> siècle.

Un des objectifs de ce travail est celui d'identifier les phases, et de comprendre la structure de la réception en France des théories de Maxwell en électricité et magnétisme.

## C H A P I T R E I I

### DEUX REACTIONS EN FRANCE A LA PUBLICATION DU TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM: J. BERTRAND ET A. POTIER

-----

SECTION II.1- LA PLACE DE J. BERTRAND DANS LA RECEPTION EN FRANCE DES THEORIES DE MAXWELL	p.28
- Le Compte Rendu du <u>Treatise</u>	p.29
- La Primauté du Concept de Force	p.33
- Les Explications Acceptables en Electrodynamique et la Controverse avec Helmholtz	p.36
- Le Mémoire sur l'Electrodynamique de Reynard	p.38
- Helmholtz et son rôle dans la Réception des Théories de Maxwell sur le Continent	p.44
SECTION II.2- A. POTIER ET LA THEORIE ELECTROMAGNETIQUE DE LA LUMIERE	p.47

La publication du Treatise en 1873 a été à l'origine, notamment, de deux articles parus en France: un "compte rendu" de J. Bertrand et un mémoire de A. Potier. Ces articles constituent à l'évidence, les premières tentatives de présentation systématique des théories de Maxwell en France.

Nous verrons que ces deux articles sont profondément distincts quant à leur esprit et à l'éventail des sujets abordés. En conséquence, nous avons été amenés à faire des analyses très différentes dans chacune des sections de ce chapitre.

Les thèmes abordés par Bertrand dans son "compte-rendu" nous ont suggérés des questions sur l'éventuelle continuité d'une tradition méthodologique en France, ayant pour origine les travaux de Laplace, Poisson et Ampère. Nous avons entrepris, alors, une enquête dont son "compte-rendu" n'a été que l'élément motivateur et où nous avons fait appel à plusieurs autres écrits de J. Bertrand. Le résultat a permis — nous le croyons — de composer un certain "type idéal" dont Bertrand semble, de toute évidence, avoir été le représentant dans la communauté scientifique française pour la période qui nous intéresse.

Le mémoire de A. Potier est, au contraire, de nature technique et constitue une exposition de la théorie électromagnétique de la lumière. Nous avons essayé de mettre en évidence la façon dont les hypothèses de base de cette théorie étaient reçues en France à l'époque de la publication du Treatise.

Malgré la différence des analyses développés dans chaque section, nous croyons qu'il est possible de caractériser, à partir d'elles, une phase de l'histoire de la réception en France des théories de Maxwell.

SECTION II.1- LA PLACE DE J. BERTRAND DANS LA RECEPTION  
EN FRANCE DES THEORIES DE MAXWELL

J. Bertrand (1822/1900) a été une personnalité centrale de la communauté scientifique française pendant la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, ayant occupé des postes importants en tant qu'enseignant et chercheur.<sup>1</sup>

Nous nous permettons de citer quelques uns de ses biographes, qui révèlent le style de son enseignement, en rapport avec un certain idéal scientifique, et qui nous aideront à mieux évaluer la portée des ses écrits que nous analyserons par la suite.

Brillouin, dans un article sur l'enseignement de Bertrand au Collège de France<sup>2</sup>, affirme notamment :

"Constituer une science d'une rigueur et d'une pureté comparables à celles de la Géométrie ou de la Mécanique céleste, en ajoutant à l'admirable théorie mathématique de la chaleur de Fourier, et à quelques travaux sur l'Hydrodynamique et la propagation du son, un chapitre de Thermodynamique et un chapitre d'Electricité, pas très étendus mais parfaits, fondés sur des principes incontestables aussi peu nombreux que possible, développés avec une rigueur mathématique impeccable dans sa simplicité, telle me paraît avoir été la tâche accomplie par J. Bertrand, comme professeur de Physique Mathématique".

Particulièrement en ce qui concerne son ouvrage de 1890 sur l'Electricité, Brillouin signale qu' "à l'époque de son apparition, Bertrand a autant étonné par l'exclusion systématique de certaines questions passionnantes, qu'il a séduit par l'élégant, rigoureux, et toujours simple enchaînement d'idées ..." , ce qui révèle quelqu'un "plus soucieux de précision que d'actualité". Brillouin fait sans doute allusion à la complète absence, dans cet ouvrage, d'une quelconque référence à Maxwell ou à ses théories.

Darboux fait un éloge de ces mêmes aspects de son oeuvre :

"Il n'ignorait certes pas que c'est surtout dans les régions troubles et obscures de la science que s'élaborent les plus brillantes découvertes (...). Mais il revendi -

quait pour la géométrie le droit, et presque le devoir de ne pas pénétrer dans ces régions. Par cette précaution qu'il a eue d'écarter les parties de la science qui sont encore en travail, il a assuré plus de durée à ses ouvrages".<sup>3</sup>

J. Bertrand nous semble appartenir à cette catégorie de " lecteur français ", à laquelle fait référence Poincaré dans la Préface de Electricité et Optique, qui n'ont pas pu trouver, dans les travaux de Maxwell, la réalisation de leurs normes méthodologiques.

### Le Compte Rendu du Treatise

Le compte rendu<sup>4</sup> de Bertrand sur la publication du Treatise est parmi les premières réactions à l'oeuvre de Maxwell en France.

Il n'aborde que des questions qui relèvent de l'électrostatique du Treatise (avec quelques références à sa magnétostatique). Bertrand promet, à la fin de l'article, de traiter ultérieurement les autres parties de l'ouvrage de Maxwell, mais cela n'a pas vraisemblablement été accompli.

J. Bertrand fait état initialement de l'importance du Treatise, "avidement accueilli sur le continent aussi bien qu'en Angleterre", pour une science de l'électricité et du magnétisme qui "n'est pas faite". Il remarque que les nombreuses tentatives d'application de l'analyse mathématique dans ce domaine s'appuient sur des principes qui ne "s'accordent pas" entre eux.

L'ouvrage de Maxwell ne serait pas une exception dans ce tableau caractérisé par "l'oubli de la rigueur et de la précision" :

"Le lecteur qui, dans un traité didactique, exigerait la perfection classique, la rigueur des définitions, l'enchaînement sévère des conséquences, et le rejet de toute conjecture hasardée, pourra, presque à chaque page, élever de sérieuses objections ..."

Après ce constat initial, Bertrand passe à l'enjeu central :

la comparaison de l'entreprise de Maxwell — basée sur l'idée d'action contigüe — et "la théorie de l'électricité statique créée par Coulomb" et développée par Poisson, Green et W. Thomson.

Il reprend les principes de cette dernière tradition qui sont ceux de la théorie des deux fluides et du paradigme Laplacien :

"Les molécules d'un même fluide se repoussent en raison inverse du carré de la distance, et attirent, suivant la même loi, celles de nom contraire; tels sont les seuls principes sur lesquels repose aujourd'hui l'admirable théorie de l'électricité statique, ils permettent de prévoir et d'expliquer tous les faits connus, jusque dans leurs plus minutieux détails ..."

Bertrand accorde à cette électrostatique une perfection presque aussi égale à celle exhibée par la Mécanique Celeste. Il s'étonne alors que Maxwell ait repoussé les principes de cette théorie pour épouser ceux "trop vagues" qui traduisent les "hypothèses de Faraday". Il se réfère à la théorie de l'action chez ce dernier:

"L'action, suivant Faraday, ne s'exerce pas à distance, les molécules contigües agissent seules, et les corps non conducteurs, qu'il nomme diélectriques, transmettent les actions suivant des lignes de force qui, en général, ne sont pas droites, à peu près comme une corde, par l'intermédiaire de poulies, transmet l'action d'un poids suspendu à son extrémité. Le milieu, dans la direction de ces lignes, éprouve une tension, et, dans la direction perpendiculaire, c'est une pression qui s'exerce, comme si chaque ligne de force repoussait les voisines".<sup>5</sup>

En particulier, cette théorie de l'action ne saurait pas expliquer, selon lui, comment les forces électrostatiques peuvent être aussi bien attractives que répulsives. Il ne comprend pas non plus comment, dans une théorie qui admet une action transmise par le milieu, le travail réalisé pour transporter une charge électrique d'un point à l'autre du milieu peut être indépendant de la trajectoire suivie.

Il soutient que si les équations admises par Maxwell sont vraies, cela est dû au fait qu'elles se fondent, en réalité, sur la loi de Coulomb, de la même façon que la théorie électrostatique tradition -

nelle.

Bertrand signale dans ce contexte, l'indépendance entre les "diverses parties de la théorie de l'électricité" exposées dans le TREATISE. Pour Bertrand le caractère "très remarquable" du livre de Maxwell tient au fait que "par une heureuse contradiction l'hypothèse des lignes de force agissant par leur tension que l'auteur veut admettre, n'y joue en réalité qu'un très petit rôle". En particulier, sa définition du potentiel "ne s'y rattache ni directement ni indirectement", étant en fait tributaire de la loi de Coulomb. D'après lui cela évite des problèmes que la théorie de l'action contigüe ne saurait résoudre.

Bertrand concède que la découverte, par Faraday, du rôle joué par les diélectriques, a posé un grand problème à l'électrostatique traditionnelle :

"La théorie ordinaire a été, il faut l'avouer, fortement ébranlée par une difficulté qui a conduit Faraday à l'abandonner; mais rien ne prouve qu'une étude plus approfondie, une hypothèse nouvelle adjointe et non substituée à celle de Coulomb, ne permettront pas de tout concilier".

Ce refus d'une rupture avec la "tradition", nous le retrouverons chez plusieurs des commentateurs de Maxwell en France. Le mailon qui permettrait de rétablir la continuité serait la théorie de l'induction magnétique de Poisson, transposée par Mossotti dans le domaine de l'électrostatique. L'hypothèse selon laquelle le diélectrique est composé de molécules qui se polarisent en présence de corps électrisés, éviterait de "tout changer".

Le rôle joué par les diélectriques, continue-t-il ,

"... est une circonstance nouvelle dont il faut tenir compte, une difficulté de plus dans le problème, mais ne suffit-il pas d'admettre, comme l'ont fait divers savants, que chaque molécule non conductrice se comporte comme une molécule magnétique dans laquelle les fluides se séparent sans pouvoir la quitter et charger les molécules voisines ?".<sup>6</sup>

Mais l'adoption de la théorie de Mossotti ne supposerait pas

l'adoption de son idée selon laquelle la polarisation des molécules du diélectrique transmet l'action électrique :

"Une telle transmission ne résulte nullement de la théorie de Mossotti ; les molécules électriques, dans son calcul, sont supposées agir à distance comme dans la théorie de Coulomb; à cette action il adjoint celle des atmosphères électriques polarisées dans l'intérieur du corps isolant, et il croit prouver que les termes introduits par elle se détruisent; il doit donc affirmer que cette polarisation n'agit pas, non qu'elle soit la cause et l'origine des actions qui subsistent et qui ont été admises A PRIORI, indépendamment de toute hypothèse sur la composition du milieu diélectrique".<sup>7</sup>

Bertrand n'est même pas prêt à admettre les principes de la théorie de Poisson qui, il s'efforce de le montrer, manquerait de "rigueur".

Mais le point central de désaccord concerne la place des hypothèses dans la théorie des diélectriques. Au lieu d'être une simple théorie mathématique qui rend compte des phénomènes observés sans faire d'hypothèses, la théorie des diélectriques de Maxwell attribuerait une réalité aux lignes de force et aux états de pression et de tension à l'intérieur du diélectrique :

"M. Maxwell ne traite cette question que pour s'efforcer d'en déduire la loi des tensions suivant des lignes de force du milieu diélectrique et des pressions qui, conformément aux vues de Faraday, s'établissent perpendiculairement. L'électricité, suivant lui, n'agit pas à distance, et si nous constatons l'action mutuelle de deux conducteurs séparés par une couche diélectrique, c'est que, dans l'intérieur de la couche, s'établissent des LIGNES DE FORCE, sorte de filets continus dont la tension transmet la force. C'est là, d'après la déclaration plusieurs fois répétée de l'éminent professeur, l'idée principale qu'il a voulu mettre en lumière et dont la traduction mathématique est le but essentiel de son livre ...".<sup>8</sup>

Bertrand cite ensuite longuement le § 529 du Treatise, où Maxwell expose l'approche de Faraday, et les procédés mathématiques qui la traduisent, en comparaison avec l'approche d'action à distance. Mais Bertrand lui oppose la perspective traditionnelle, qui est celle

des "mécaniciens" :

"Telles sont les hypothèses auxquelles M. Maxwell s'efforce de donner l'appui et la consécration d'une étude mathématique. Mais l'existence supposée d'une tension dans un sens et d'une pression dans le sens perpendiculaire ne saurait ni constituer une théorie ni lui servir de base. La force est pour les mécaniciens la cause nécessaire des phénomènes, et la science du mouvement est trop avancée aujourd'hui et trop parfaite pour qu'on puisse accueillir autrement que comme un pas rétrograde toute tentative qui poserait comme loi primordiale la répartition des tensions au sein d'un milieu continu ou l'expression d'un potentiel dans l'espace. De tels essais, lors même qu'on parviendrait à les constituer logiquement, sans hypothèses surabondantes, laisseraient subsister chez les géomètres le désir, j'oserais dire le besoin de découvrir les forces qui servent de ressort et de moteur".<sup>9</sup>

Ce scepticisme de Bertrand vis à vis de la théorie de Maxwell s'est réflété dans son enseignement. Dans ses Leçons sur la Théorie Mathématique de l'Electricité, on ne trouve aucune référence à cette théorie. Il n'y traite même pas des diélectriques. Quand il se réfère aux lignes de force de Faraday, c'est à partir " d'un point de vue abstrait sans intervention des théories électriques et magnétiques". Il se garde de prendre position sur leur "réalité" :

"Le mode de représentation que nous venons d'indiquer est fort élégant. Les physiciens en font grand usage et semblent même, dans un grand nombre de cas, faire de l'image une réalité".<sup>10</sup>

#### La Primauté du Concept de Force

En dépit du caractère partiel et peu approfondi de son compte-rendu du Treatise, Bertrand soulève quelques uns des thèmes qui seront souvent repris par les commentateurs français de Maxwell.

Nous y trouvons, d'abord, une critique logique des théories de Maxwell. Ses théories manqueraient de "rigueur". Le Treatise serait

un amalgame de théories indépendantes et, même, incompatibles. Les idées auxquelles Maxwell fait appel, comme celle d'action contigüe, n'auraient qu'un rôle marginal, les déductions étant en fait fondées sur les lois de l'électrostatique traditionnelle.

Liée à cette dernière appréciation il y a la conviction que le rôle des diélectriques en électrostatique peut être traité sans remettre en question les théories classiques, si l'on introduit l'hypothèse de Mossotti ( Voir Appendice A). L'hypothèse d'une polarisation diélectrique prend place naturellement à l'intérieur d'une approche fondée sur l'action à distance.

Nous aurons l'opportunité de nous pencher sur cette théorie de la polarisation diélectrique dans les chapitres suivants, avec les éléments techniques nécessaires. Il suffit maintenant de souligner ces thèmes, qui ont eu une longue vie dans l'histoire de la réception des théories de Maxwell en France.

Nous voudrions nous arrêter, cependant, sur un thème qui nous semble être associé à Bertrand d'une façon plus particulière : celui de la primauté accordée au concept de force.

Bertrand n'est pas simplement un défenseur des explications mécaniques, mais de celles qui font appel aux forces centrales agissant à distance. L'idée d'une action médiatisée, où interviennent des concepts comme la "tension" ou la "pression", n'aurait pas de place en Physique, et ne pourrait pas remplacer une explication en termes du concept de force et de l'hypothèse que l'action se transmet à distance.

Ces considérations sont dirigées clairement contre la théorie du chapitre V du Treatise, où Maxwell démontre que la force électrostatique entre deux systèmes électrisés peut être considérée comme la manifestation d'un état de contrainte du milieu qui les sépare. Avant ce chapitre Maxwell développe, effectivement, la théorie électrostatique "classique", fondée sur l'action à distance, ce qui renforce chez Bertrand sa conviction sur le caractère marginal de la théorie de l'état de contrainte du milieu diélectrique.

Toutefois, nous croyons que le rôle central que Bertrand accorde au concept de force dépasse le seul enjeu des théories de la transmission de l'action, pour toucher à des questions plus générales, con-

cernant la nature de l'explication dans les théories physiques.

A l'intérieur de cette problématique plus générale semble se situer la méfiance avec laquelle Bertrand accueille les raisonnements fondés sur le principe de conservation de l'énergie.

Il se produit en fait, au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, une transformation conceptuelle majeure en Physique, qui aboutit à changer l'hiérarchie qui attribuait au concept de force un rôle primaire dans la construction théorique. La formulation du principe de conservation de l'énergie a eu comme effet de rendre au concept d'énergie le rôle jusqu' alors joué par celui de force.<sup>11</sup>

Déjà en 1869, dans une série d'articles où Bertrand analyse des travaux sur le principe de conservation de l'énergie, nous constatons sa reticence à l'égard de cette nouvelle approche :

"La conservation exacte de l'énergie, quoique très admirable, laisse encore, on le comprend, bien des obscurités à démêler, une seule loi ne saurait tout régler. Toutes les forces naturelles, en changeant de nom et de nature, peuvent également se tourner aux effets les plus contraires, l'étude de ces transformations et des conditions sous lesquelles elles s'accomplissent forme la science. Se dispenser d'en suivre et d'en approfondir le détail pour ne voir qu'un compte à établir entre le travail reçu et le travail rendu, en se félicitant de n'avoir pas à s'inquiéter des mécanismes qui le transmettent et des causes qui déterminent les transformations, c'est commettre l'erreur de celui qui, pour juger l'administration d'un pays, se contenterait d'additionner les recettes de toute nature, en constatant l'égalité parfaite du résultat avec le chiffre total des dépenses".<sup>12</sup>

C'est d'ailleurs dans cette série d'articles que Bertrand fait une référence rapide à l'illustration mécanique proposé par Maxwell dans le mémoire DT, et appliquée à l'interaction électrodynamique<sup>13</sup>. L'essentiel de sa critique concerne le caractère du raisonnement analogique, qui n'est pas considéré comme une "explication". Nous aurons l'opportunité d'exposer ce raisonnement de Maxwell et, à l'occasion, nous reviendrons sur les critiques de Bertrand. Ce que nous devons signaler ici est la signification de cette "illustration mécanique". Maxwell inaugure dans le mémoire DT une nouvelle approche des phénomènes électrodynami -

ques, qui va atteindre sa maturité dans la théorie des circuits électriques du Treatise . Il s'agit d'appliquer le formalisme de la Mécanique Analytique aux phénomènes électrodynamiques. Cette théorie sera considérée, par des commentateurs tel que Poincaré, comme un des aspects les plus novateurs des travaux de Maxwell.

Bertrand, dans son Compte Rendu de Electricité et Optique de Poincaré, va diriger ses critiques justement contre cette théorie dynamique proposée par Maxwell et reprise par Poincaré.<sup>14</sup> Ces savants, dit-il, demanderaient "trop peu" à une explication physique, et ils auraient abandonné toute recherche de la "cause". Il s'attaque ici surtout à Poincaré, qui voyait dans la formulation Lagrangienne des phénomènes électrodynamiques l'avantage de laisser de côté toute recherche du "mécanisme" sous-jacent aux phénomènes, une quête qui relevait, pour ce dernier, de la métaphysique.

Cependant, Bertrand ne voyait sûrement pas d'un bon oeil n'importe quelle spéculation sur la cause des phénomènes. Pour lui l'explication devait vraisemblablement s'arrêter à la spécification des forces qui rentrent en jeu. Aller au delà; cela serait téméraire et même, abusif. Mais se contenter de donner l'énergie potentielle du système, et l'introduire dans les équations de Lagrange, cela serait se dérober au but explicatif des théories physiques.

Dans ses Leçons sur la Théorie Mathématique de l'Electricité Bertrand fait des remarques du même genre, concernant les théories de Helmholtz et de W. Thomson de l'induction électromagnétique, basées sur le principe de conservation de l'énergie :

"Il y a grande exagération à voir dans les considérations de ce genre l'explication et la preuve des phénomènes d'induction. Les faits pourraient être très différents, sans que les principes de conservation qu'on invoque cessassent d'être respectés".<sup>15</sup>

Ces propos semblent renvoyer à un certain paradigme auquel adhérerait Bertrand et, probablement, d'autres savants français de l'époque. Nous nous contentons pour l'instant à poser ce problème, auquel des éléments seront apportés tout au long de ce travail.

Les Explications Acceptables en Electrodynamique  
et la Controverse avec Helmholtz

En électrodynamique Bertrand semble prendre comme modèle la démarche d'Ampère dans son Mémoire sur la Théorie Mathématique des Phénomènes Electriques, Uniquement Déduite de l'Expérience. Il s'agit de chercher, affirme Ampère,

"des forces agissant toujours entre deux particules matérielles suivant la droite qui les joint, de manière que l'action exercée par l'une d'elles sur l'autre soit égale et opposée à celle que cette dernière exerce en même temps sur la première..."<sup>16</sup>

Dans une controverse<sup>17</sup> qui a opposé Bertrand à Helmholtz, concernant le potentiel de deux éléments de courant, proposé par ce-dernier dans son mémoire de 1870 (voir Appendice B), le savant français a pris la défense de la loi d'Ampère. Bertrand avait, d'ailleurs, complètement tort dans ses critiques adressées à Helmholtz, comme l'a montré Poincaré plus tard.<sup>18</sup>

Comme conséquence de l'expression proposée par Helmholtz pour le potentiel électrodynamique de deux éléments de courant, il agirait sur chaque élément, en plus d'une force suivant la droite qui joint deux des éléments, aussi un couple qui tend à tourner l'élément. Pour des courants fermés, l'expression de Helmholtz conduit aux mêmes résultats que celle d'Ampère pour la force électrodynamique.

Bertrand a soutenu que le fil ne pouvait être stable, et se briserait sous l'action d'un tel système de forces. Son argument, erroné, ne nous intéresse pas ici, mais constitue une évidence de son attachement à une électrodynamique comme celle d'Ampère. Dans le dernier de cette série d'articles, qui boucle la controverse (sans qu'il y ait consensus), Bertrand affirme vis à vis de l'expression de Helmholtz :

"Cette loi, très différente de celle d'Ampère, en a été déduite cependant par le calcul seul, sans qu'aucune expérience nouvelle ait été invoquée, et sans qu'aucun des faits admis par notre illustre compatriote n'ait été révo -

qué en doute.<sup>19</sup> La seule preuve qu'on allègue en sa faveur est le complet accord avec celle qu'elle doit remplacer dans le cas où l'expérience a été faite, et l'impossibilité de faire l'expérience dans le cas où l'accord n'a pas lieu.

Une théorie ainsi motivée ne présente, A PRIORI, ni plus ni moins de vraisemblance que les autres lois, en nombre infini, qui s'accordent avec celle d'Ampère lorsque le courant attirant est fermé, la loi d'Ampère cependant restant distincte et supérieure à toutes les autres, parce que seule elle remplit la condition, bien naturellement acceptée, d'une action élémentaire dirigée suivant la droite qui réunit les deux éléments".<sup>20</sup>

Mis à part l'intérêt de cette controverse pour éclairer les positions méthodologiques de J. Bertrand, nous verrons plus bas qu'elle soulève des doutes sur une thèse historiographique, concernant le rôle qu'Helmholtz aurait joué dans l'introduction des théories de Maxwell sur le continent européen.

#### Le Mémoire sur l'Electrodynamique de Reynard

Le contenu de cette section se rattache à ce qui précède par les éléments additionnels qui seront fournis, concernant la caractérisation de J. Bertrand en tant que chercheur et enseignant et de son rôle dans la réception des théories de Maxwell en France.

L'enjeu cependant dépasse ces limites, étant donné l'importance du mémoire sur l'électrodynamique de Reynard en ce qui concerne les débats autour des hypothèses sur la transmission de l'action en France. J. Bertrand a fait partie du jury qui a jugé ce mémoire pour une éventuelle publication dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.

L'importance de ce travail ne peut pas être minimisée, puisqu'il a été primé par l'Académie des Sciences en 1878. Nous donnerons par la suite un aperçu de ce mémoire.

En 1864, Reynard soumet au jugement de l'Académie une note ayant comme titre "Le mode d'action des forces électrodynamiques".<sup>21</sup>

Cette note n'est malheureusement pas publiée. L'auteur présente dans une lettre les motivations de sa théorie.

Il s'agit, dit-il, de chercher "la cause des actions électrodynamiques et magnétiques", en faisant appel à des "mouvements giratoires ou tourbillons dans le milieu éthéré environnant".

Cette idée nous renvoie immédiatement à la théorie développée par Maxwell en 1861 dans le mémoire PH. Nous verrons que dans les détails les deux théories sont, cependant, différentes, celle de Maxwell étant beaucoup plus ambitieuse, puisqu'elle prétendait expliquer tous les phénomènes qui ont lieu dans le "champ" (actions électrodynamiques, induction électromagnétique, etc.) tandis que celle de Reynard ne vise que l'action électrodynamique découverte par Ampère. De toute façon, nous verrons qu'aucune référence n'est faite à Maxwell tout au long du mémoire.

La Note de Reynard a été rendue à l'examen de MM. Becquerel et Fizeau, mais il n'y a pas dans les numéros suivants des Comptes Rendus un quelconque rapport à ce sujet.

En 1868 Reynard présente à l'Académie un mémoire sur une "Nouvelle théorie des actions électrodynamiques". L'Avant Propos est publié dans les Comptes Rendus<sup>22</sup>, et l'intégralité du mémoire, en 1870, dans les Annales de Chimie et de Physique<sup>23</sup>

A l'origine du mémoire de Reynard se trouve une critique à l'électrodynamique d'Ampère :

"... il m'a toujours semblé difficile d'admettre le principe de cette théorie, qui repose sur une assimilation des forces électrodynamiques aux forces qui existent entre les atomes de la matière. Quand le conducteur d'un courant est mis en mouvement par l'effet de la présence d'un autre courant, c'est la matière de ce conducteur qui reçoit l'action; mais cette action ne provient pas de la matière du conducteur de l'autre courant, ni même de celle du fluide qui est supposé suivre ce conducteur. Puisque l'expérience prouve que les parties élémentaires d'un courant peuvent se composer ou se décomposer comme des vitesses, puisque le repos annule l'effet et que le changement de la direction de la marche change l'attraction en répulsion, c'est évidemment le mouvement qui est la cause de l'effet. Il n'y a donc plus là action réciproque et directement opposé entre les parties de matière, mais des effets produits sur des corps séparés, par

suite de la simultanéité de mouvements existant dans ces corps. Pour concevoir que cette simultanéité puisse produire ces effets, il faut admettre l'existence d'un milieu intermédiaire, par lequel les mouvements puissent se transmettre. Mais alors l'action sur le conducteur d'un courant doit se produire dans une direction normale à la surface de ce conducteur, comme dans tous les mouvements communiqués par les fluides".

Il est important de mettre en évidence le point de désaccord entre Reynard et Ampère. Nous croyons qu'il concerne la nature du courant électrique qui doit déterminer, selon Reynard, les effets du courant et le mode de transmission de ces effets. Reynard ne semble pas être concerné par les débats sur le mode de transmission de la force ( action à distance ou action contigüe) et, à ce niveau, sa motivation est totalement différente de celle de Maxwell. Reynard décide en faveur d'une action médiatisée et contigüe comme conséquence d'un raisonnement, et n'en fait pas un principe: si la cause de l'action électrodynamique est un mouvement, cette action ne peut être transmise que par un mouvement. D'où l'idée des tourbillons dans un milieu, et de l'action contigüe du milieu sur la matière des conducteurs.

Le problème de Reynard avait, néanmoins, été résolu dès 1846. Weber avait montré qu'il était possible d'expliquer non seulement l'action électrodynamique, mais aussi l'induction électromagnétique, en supposant une action à distance entre particules électriques en mouvement dans les conducteurs (voir Appendice B). Cette observation n'enlève cependant pas l'intérêt à la théorie de Reynard, qui peut, en fait, être jugée indépendamment des motivations qui l'ont engendrée.

La théorie électrodynamique de Reynard se développe à deux niveaux, qui rappellent, d'ailleurs, les niveaux explicatifs du mémoire PH de Maxwell.

Il propose d'abord une nouvelle expression de la force électrodynamique sur un élément de courant  $ds'$ , en raison de la présence de l'élément  $ds$  :

$$R' = \frac{i i' ds ds' \sin \theta \cos \mu'}{r^2}$$

où  $\theta$  est l'angle de l'élément  $ds$  avec la droite  $r$  ;  $\mu'$  est l'angle de l'élément  $ds'$  avec le plan  $rds$ .

La force  $R'$  est normale à l'élément  $ds'$ , et il n'y a plus, comme dans la théorie d'Ampère, "une action et une réaction égales et opposées, mais sur chacun des deux éléments une action différente, dirigée normalement à cet élément et dans le plan déterminé par l'autre élément".<sup>24</sup> Reynard montre que son expression conduit aux mêmes résultats que ceux de la théorie d'Ampère, en ce qui concerne l'interaction des courants fermés.

Reynard soutient que son expression a l'avantage, sur celle d'Ampère, non seulement d'être moins compliquée, mais surtout de permettre la recherche du mode par lequel s'effectue l'action électrodynamique.

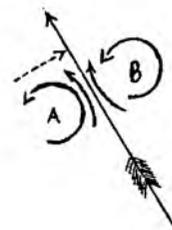
Il se pose alors la question du "mécanisme" par lequel la force agit et se transmet. Cette théorie, qu'il développe dans la deuxième partie de son mémoire, a pour Reynard un statut indépendant des développements antérieurs qui lui ont permis d'aboutir à l'expression pour la force  $R'$ . Il attribue, néanmoins, une grande vraisemblance à cette théorie, sans pour autant affirmer qu'elle est "l'expression de la vérité".

Elle suppose l'existence de tourbillons dans le milieu qui se "polarisent" au passage du "fluide électrique". L'effet du mouvement du fluide électrique est celui de freiner ou d'accélérer la rotation des tourbillons qui lui sont contigus. Reynard montre alors, comment la différence de rotation des tourbillons peut être à l'origine de l'action électrodynamique sur le conducteur qui transporte le courant électrique. Reynard formule d'ailleurs, sans citer ni Faraday, ni Maxwell, le principe de la théorie des pressions et de tensions dans le milieu:

" Quand un tourbillon est formé dans un fluide, deux actions se produisent sur le milieu environnant et sur les corps voisins: dans le plan du mouvement de rotation, la force centrifuge, en projetant les molécules mises en mouvement, produit le même effet qu'une force de répulsion devant du centre; dans le sens de l'axe du tourbillon, il y

a, au contraire, un effet d'attraction vers ce centre , parce que le fluide extérieur afflue dans l'axe et suivant l'axe, pour combler le vide produit par la force centrifuge".

Nous reproduisons une figure du texte où Reynard illustre comment le tourbillon A, qui est activé par le passage du courant, et le tourbillon B qui est ralenti, peuvent agir sur le conducteur de façon à produire une force non balancée (flèche en pontillée). La figure montre, en particulier, que le mécanisme conçu par Reynard est différent de celui de Maxwell. Chez ce dernier les tourbillons ne préexistent pas dans le milieu avant le passage du courant mais sont, au contraire, mis en rotation par le courant. Donc, chez Maxwell les tourbillons A et B de la figure tourneraient dans des sens opposés.



Reynard tâche de montrer que l'expression de la force électrodynamique qu'il a proposée peut être déduite de son mécanisme, ce qui pour lui est un argument supplémentaire en faveur de son "système". Il se montre, cependant, prudent :

" Je n'affirme qu'une chose, c'est que le système que je présente pour l'explication des effets des courants, est l'équivalent de la vérité".

En 1878 l'Académie des Sciences<sup>25</sup> offre un prix pour des recherches sur le sujet suivant :

"Diverses formules ont été proposées pour remplacer la loi d'Ampère sur l'action de deux éléments de courant : discuter ces diverses formules et les raisons qu'on peut alléguer pour accorder la préférence à l'une d'elles".

Reynard reçoit , pour ses recherches, un "Encouragement"; le prix n'a pas été décerné.<sup>26</sup>

J. Bertrand a été le rapporteur (Regnault, Fizeau et E. Becquerel, commissaires) désigné par l'Académie pour le mémoire présenté par Reynard.<sup>27</sup>

Après avoir souligné que la loi d'Ampère est la seule qui s'accorde avec l'hypothèse que " l'action d'un élément est égale à la réaction, et dirigée par conséquent suivant la droite qui joint les deux points entre lesquels elle s'exerce ", Bertrand admet l'intérêt d'une recherche d'autres lois, différentes de celle d'Ampère, qui puissent s'accorder avec les faits expérimentaux.

Il croit, cependant, qu'il serait possible de décider expérimentalement entre les deux lois (celles d'Ampère et de Reynard).

Bertrand remarque, néanmoins, que les idées de Reynard ne sont pas nouvelles. Gauss dès 1867 aurait proposé une loi semblable, et dans le mémoire même d'Ampère apparaîtrait une expression comme celle de Reynard. Dans une autre note<sup>28</sup> Bertrand fait allusion aussi à un article de Liouville<sup>29</sup>, daté de 1831, où il montre qu'on ne doit pas écarter à priori,

"... une théorie systématique où l'on expliquerait par des forces primitives d'atome à atome, ou par des vibrations de fluide, les propriétés des fils conducteurs ..."

Le rapport de Bertrand est, donc, peu enthousiaste ... Il est remarquable qu'il n'y ait pas de discussion sur le mécanisme des tourbillons proposé par Reynard, ce qui met en évidence le peu de sympathie qu'il avait pour ce genre de spéculations. Il est aussi remarquable, que dans sa liste des précurseurs de Reynard il ne fasse aucune mention à Maxwell ou à Faraday. Si Bertrand connaissait, à l'époque, le mémoire de Maxwell de 1861, il devait le considérer comme un autre de ses "systèmes" auxquels se réfère Reynard, voués à disparaître derrière la progression des acquis définitifs de la science ...

Dans ses Leçons sur la Théorie Mathématique de l'Electricité (1890), Bertrand se montre plus réceptif à des théories comme celle de Reynard. Dans une longue discussion, au sujet des limitations d'une "explication" de l'induction électromagnétique fondée uniquement sur le principe de conservation de l'énergie, il montre que plusieurs "explications" sont également compatibles avec ce principe. Un de ces "scénarios" théoriques est le suivant :

" Un courant existe dans un fil. Les fluides électriques y sont animés de mouvements entièrement inconnus; mais le phénomène est plus complexe, il s'étend dans l'espace qui environne le fil; un aimant qu'on y place, un autre courant qu'on y fait naître sont immédiatement attirés ou repoussés. Le milieu dans lequel ils sont plongés n'est donc pas à l'état normal; il n'est pas admissible que le courant agisse à distance quand on lui présente une occasion de travail, et ne produise au même lieu, quand cette occasion manque, aucune influence mécanique. Le courant qui traverse un fil produit donc et maintient dans l'espace qui l'environne des agitations inconnues mais continues. Lorsque ces agitations produisent des effets observables, le courant n'y est plus pour rien : il a joué son rôle en les faisant naître; les conséquences seront ou non perceptibles à nos yeux, il n'en doit résulter pour lui aucun trouble".<sup>30</sup>

Le contexte théorique de 1890 n'était pas le même, et l'hypothèse de l'existence d'un milieu avait reçu une éclatante confirmation, au vu des physiciens de l'époque, par les expériences de Hertz. Toujours est-t-il que J. Bertrand ne mentionne pas Maxwell comme celui qui a, d'abord, proposé une théorie de l'induction électromagnétique basée sur les hypothèses qu'il décrit dans l'extrait qu'on vient de citer.

#### Helmholtz et son rôle dans la Réception des Théories de Maxwell sur le Continent

Une thèse assez répandue parmi les historiens des sciences qui se sont un peu penchés sur la réception des théories de Maxwell dans le "continent" européen (c'est à dire hors de la Grande-Bretagne), est celle qui attribue à Helmholtz un rôle central dans la dynamique de cette réception.

Ainsi, un des biographes de Helmholtz considère la longue controverse qui a opposé ce dernier à Weber, comme un facteur qui a contribué à l'acceptation des théories de Maxwell.<sup>31</sup>

"The confrontation ultimately proved indecisive, yet it undermined the confidence of Continental physicists in Weber's theory and facilitated acceptance of Maxwell's

theory, which replaced Weber's after 1880".

La controverse s'appuierait sur la compatibilité entre la loi de Weber de l'interaction entre particules électriques en mouvement relatif, et le principe de conservation de l'énergie. Maxwell lui-même fait référence dans ses écrits aux "problèmes mécaniques" auxquels se heurterait l'électrodynamique de Weber, en se référant à la critique de Helmholtz.

Ce même biographe souligne aussi le rôle de l'électrodynamique élaborée par Helmholtz à l'époque de sa nomination à la chaire de physique à Berlin, dans la diffusion des théories de Maxwell :

"Helmholtz inaugurated his new position with a series of papers critically assessing the various competing theories of electrodynamic action. This work first brought Maxwell's field theory to the attention of Continental physicists..."

Wise<sup>32</sup> aussi reprend la même thèse : "Helmholtz translated Maxwell's theory into terms comprehensible to Continental physicists..."

Harman<sup>33</sup> est du même avis : :

"It was through Helmholtz's version of the electromagnetic theory of light that Continental physicists became familiar with Maxwell's work. Maxwell's Treatise was considered to be a difficult and ambiguous work, and Helmholtz was thought to have remedied the conceptual impenetrability of Maxwell's ideas, making his theory intellegible. In the 1870s Hertz and H. A. Lorentz came to Maxwell's electromagnetic theory of light through Helmholtz's supposition of a central force theory".

Nous pourrions citer encore d'autres versions de cette thèse, qui revient sans cesse dans la littérature spécialisée.

Il nous a été impossible de lui trouver des évidences favorables en ce qui concerne la communauté scientifique française, même si elle semble indiscutable pour l'Allemagne (le témoignage de Hertz est, en ce sens, définitif).

Nous croyons pouvoir affirmer que les théories de Maxwell étaient connus en France bien avant la publication de l'électrodynamique

de Helmholtz. Ainsi, Verdet fait allusion au mémoire PH de Maxwell dès 1863. Il est vrai, toutefois que la référence de Verdet est très sommaire et ne concerne que la théorie de Maxwell de la rotation magnétique de la lumière polarisée. Il est aussi vrai que nous n'avons pas pu trouver d'autres références à Maxwell avant 1870 (précisément l'article de Bertrand que nous avons cité plus haut, et qui traite du mémoire DT de Maxwell).

En tout cas, il nous semble irréfutable que Maxwell a été introduit et discuté en France, jusqu'aux leçons de Poincaré de 1888, dans un contexte tout à fait indépendant de l'électrodynamique de Helmholtz .

Dans la controverse qui a opposé Bertrand à Helmholtz sur l'électrodynamique de ce dernier, il n'est nulle part question de Maxwell. Et pourtant, la théorie électromagnétique de Maxwell était une des motivations pour l'élaboration de cette électrodynamique. La controverse est restée, cependant, sur le terrain de l'électrodynamique classique.

SECTION II.2- A. POTIER ET LA THEORIE ELECTROMAGNETIQUE  
DE LA LUMIERE

Le premier exposé d'ensemble des hypothèses de Maxwell et de sa théorie électromagnétique de la lumière, en France, est probablement celui de Potier, daté de 1873: "Egalité des constantes numériques fondamentales de l'optique et de l'électricité".<sup>34</sup>

L'importance du travail de Potier dans le cadre général de notre étude ne se résume pas à cette évidence strictement chronologique. Nous avons relevé des témoignages qui le placent parmi les premiers divulgateurs de Maxwell en France.

Poincaré affirme, par exemple, dans sa Préface aux Mémoires sur l'Electricité et l'Optique de Potier publiés par A. Blondel (1912):

"Les rapports de l'Optique et de l'Electricité devaient naturellement attirer l'attention de Potier, qui a beaucoup contribué à populariser Maxwell".

Potier fait initialement des recherches suivant le programme traditionnel des théories éther-élastiques de la lumière. Son article de 1873 que nous analyserons par la suite montre, cependant, l'intérêt qu'il a porté, très tôt, à l'approche électromagnétique de l'Optique proposée par Maxwell. Dans cette direction nous pouvons situer ses travaux sur la polarisation rotatoire magnétique.<sup>35</sup>

Les contributions de Potier dans ce domaine n'ont pas été très importantes, probablement pour des raisons d'ordre personnel comme le soulève Blondel, l'éditeur de ses Mémoires :

"Potier, et c'est un service capital qu'il a rendu à notre enseignement, a été en France, l'introducteur et le grand champion des théories de Maxwell; mais la maladie l'a empêché de prendre part à l'édification des nouvelles théories

## électroniques de l'électricité ..."36

Toutefois nous n'avons pas pu confirmer les propos de Blondel qui attribuent à Potier un rôle de pionnier dans l'enseignement des théories de Maxwell. Les plusieurs éditions que nous avons consultées de ses Cours à l'Ecole Polytechnique, montrent qu'il n'y a pas de référence aux théories de Maxwell avant 1891/2. Les Leçons sur l'Electricité et le Magnétisme de Mascart et Joubert, qui accordent une large place à ces théories, datent de bien avant (1882).

Il est cependant indéniable que Potier a contribué à l'introduction des théories de Maxwell en France, comme le montrent son article de 1873 et aussi ses notes à l'édition française du Treatise datée de 1885 (vol. I) et 1887 (vol. II). Nous aurons aussi l'occasion d'analyser son enseignement à l'Ecole Polytechnique, concernant la théorie électromagnétique de la lumière.

L'influence de Potier dans la communauté scientifique française ne peut pas être minimisée si l'on se réfère au témoignage de Poincaré :

"... ce n'était pas seulement sur ses élèves que son action s'exerçait; il n'était pas un physicien qui ne fût heureux de venir lui demander un conseil; dans tout ce qu'on a fait en France depuis vingt ans il y a une parcelle de sa pensée. Dans son cabinet, à côté du savant qui venait lui soumettre une question de science spéculative, on rencontrait l'industriel qui le consultait sur une difficulté pratique"<sup>37</sup>

Dans ce qui suit nous allons essayer de mettre en relief les points de l'article de Potier de 1873 qui peuvent constituer des signes d'une lecture particulière des théories de Maxwell, ou de la façon dont elles ont été reçues en France à cette époque.

Le titre de l'article de Potier de 1873 renvoie à une thèse historiographique qui est énoncée dès le début. Après une comparaison

des mesures de Weber, Thomson et Maxwell du rapport entre l'unité électromagnétique et l'unité électrostatique d'électricité, avec la mesure par Fizeau et Foucault de la vitesse de la lumière, il affirme :

"L'identité inattendue de deux nombres ayant une origine si différente a porté deux savants, M. Maxwell et M. Lorenz, à chercher quel sens on pouvait attacher à cette coïncidence. Par des procédés analogues, ils sont arrivés à cette conclusion, que le milieu qui propage les ondes lumineuses est en même temps celui qui propage les actions électriques. Pour tous deux, les vibrations qui, dans la théorie des ondu - lions, constituent la lumière, seraient des courants électri - ques se propageant dans les milieux transparents. Tous les deux, adoptant les idées de Faraday, font jouer aux milieux isolants ou diélectriques un rôle prépondérant dans toutes les actions électrodynamiques et électrostatiques".<sup>38</sup>

Potier soutient un certain nombre de thèses dans ce paragra - phe, qui sont fausses du point de vu historique. Une analyse détaillée de la première formulation par Maxwell de sa théorie électromagnétique permet d'établir que l'égalité des deux mesures, à laquelle Potier fait référence, n'a pas été le point de départ des recherches de Maxwell. Cette reconstruction conduit non seulement Potier à identifier les proble - matiques de Lorenz et Maxwell, mais encore à considérer ces deux savants comme les héritiers de Faraday. Lorenz est parti, au contraire, d'un cadre théorique tout a fait différent - constitué par les investigations de Kirchhoff sur le mouvement de l'électricité dans des conducteurs , ainsi que des motivations métaphysiques sur une supposée "unité des for - ces naturelles".<sup>39</sup>

Nous pouvons supposer que cette reconstruction de la génèse de la théorie électromagnétique de la lumière repondait à un besoin de fournir un fondement expérimental (et non pas spéculatif)   l'entrepr - ise théorique de Maxwell, dans un contexte peu favorable à son accepta - tion.<sup>40</sup> Il est aussi possible que les mémoires de Maxwell antérieurs au Treatise, notamment les deux premiers, soient passés pratiquement ina - perçus en France et que Potier n'ait donc pas eu une vision globale du cheminement théorique du savant  cossais.

Nous remarquons que dans cet article de Potier la théorie de

Maxwell est présentée fondamentalement comme une théorie de la lumière, plutôt qu'une théorie alternative des phénomènes électriques et magnétiques. L'intérêt qu'il portait à l'Optique peut expliquer cette sélection et suggérer qu'au moins en France, les chercheurs dans ce domaine ont été les plus sensibles à Maxwell.<sup>41</sup>

La première partie de l'article concerne le "rôle des diélectriques", où Potier introduit les concepts fondamentaux de "déplacement électrique" et de "courant de déplacement".

Nous remarquons la façon tout à fait naturelle avec laquelle Potier introduit, en tête, l'idée révolutionnaire de Maxwell selon laquelle il n'existerait que des courants fermés. Il considère en effet le courant de décharge d'un condensateur comme un courant fermé :

"Ce courant jouissant de toutes les propriétés connues des courants fermés ordinaires, nous admettrons que le circuit est réellement fermé par le diélectrique. Dès lors les lois de Faraday s'appliquent à ce courant presque instantané qui accompagne l'accumulation de l'électricité; notamment celle-ci: l'intensité du courant ou la quantité d'électricité qui traverse une section quelconque du circuit (y compris le diélectrique) est la même quelle que soit cette section".<sup>42</sup>

Potier semble donc accorder une base expérimentale à l'hypothèse selon laquelle tous les courants se ferment à travers le diélectrique, le courant de décharge d'un condensateur "jouissant de toutes les propriétés connues des courants fermés ordinaires". Parmi ces "propriétés connues" il range certainement les effets magnétiques et électrodynamiques des courants de déplacement. Le problème est, contrairement à ce que Potier laisse entendre, qu'il n'y avait pas à l'époque de base expérimentale pour cette hypothèse. Le prix qui sera proposé par l'Académie des Sciences de Berlin en 1879 concernera justement le test expérimental de cette hypothèse.

Prendre cette hypothèse comme point de départ ne correspond non plus, à la genèse historique des idées de Maxwell. Chez lui le concept de déplacement électrique ne supposait pas (et n'impliquait pas non plus) initialement, l'hypothèse que tous les courants sont fermés; et encore moins que les courants de déplacement produisent les mêmes effets

que les courants de conduction. Ces propositions sont associées seulement à partir du mémoire DT.<sup>43</sup> Il est aussi curieux d'attacher le nom de Faraday à cette proposition, car la notion de déplacement électrique est Maxwellienne par excellence. Nous sommes là devant cette typique illusion retrospective qui établit une continuité où il y a eu, en fait, une grande rupture. Mis à part ce commentaire historique, l'article de Potier nous intéresse justement par l'ordre logique non usuelle dans laquelle sont introduits les concepts.<sup>44</sup> Nous continuons donc à suivre le raisonnement de l'auteur.

Après introduire l'hypothèse du courant de déplacement et ses propriétés, Potier continue en remarquant que la densité superficielle de charge d'un condensateur est proportionnelle à la force électromotrice résultante. Il fait appel alors à la "loi de Faraday", formulée plus haut, pour affirmer la proportionnalité entre le déplacement électrique (défini comme la charge électrique qui traverse une unité de surface) et la force électromotrice :

"En adoptant le langage proposé nous dirons que chaque unité de la surface de l'armature a été traversée par une quantité d'électricité proportionnelle à cette force. Pour être conséquent avec l'hypothèse admise, nous admettrons que la même chose a lieu dans l'intérieur du corps isolant".<sup>45</sup>

La proportionnalité entre le déplacement électrique et la force électromotrice est donc une notion dérivée, en quelque sorte, de l'uniformité du courant (la "loi de Faraday"), ce qui constitue une inversion logique des développements de Maxwell.<sup>46</sup> Nous voyons ici les symptômes d'une difficulté vis à vis du statut des grandeurs "déplacement électrique" et "courant de déplacement". Comment fonder cette proportionnalité sans faire appel à une simple analogie, comme dans le Treatise ? Potier expose cette analogie après sa "déduction" :

"... nous assimilerons l'état d'un diélectrique, limité par des corps électrisés, à un déplacement des diverses parties de ce diélectrique, déplacements qui, comme dans tous les corps élastiques (et isotropes), produisent des forces qui leur sont proportionnelles".

Le déplacement électrique est, ensuite, associé à la notion d'une polarisation diélectrique. Cette notion est introduite comme une tentative de donner une explication au pouvoir inducteur spécifique des diélectriques :

"Quelques-uns, assimilant l'état des corps isolants, soumis à des influences électriques, à celui du fer doux soumis à des influences magnétiques, imaginent qu'ils sont constitués par des molécules matérielles, se POLARISANT par influence comme des corps conducteurs, séparées par des intervalles remplis d'un fluide tout à fait inerte, à travers lequel se propagent les actions à distance. D'autres, suivant plus rigoureusement les idées de Faraday, admettent que cette polarisation a lieu dans toute la masse du corps isolant, celui-ci fût-il le vide, et que c'est par l'intermédiaire de cette polarisation que se transmettent les forces électriques. C'est cette dernière polarisation dont le DEPLACEMENT n'est que l'expression mathématique".<sup>47</sup>

Cette dernière hypothèse suppose la continuité de la substance qui occupe les diélectriques, et qui peut subir un déplacement comme conséquence d'une force électromotrice externe. Cette continuité suggère, selon Potier, l'idée d'un milieu fluide occupant les diélectriques :

"Si nous imaginons donc qu'un fluide spécial, remplissant toute la masse du diélectrique, subisse dans ses diverses parties un déplacement (  $f, g, h$  ), proportionnel à la force électromotrice, la valeur de ce déplacement sur les surfaces qui limitent le diélectrique étant la densité superficielle de l'électricité sur ces surfaces, la seule et unique condition à laquelle ce fluide soit assujettie, en vertu des lois de Coulomb, est l'invariabilité de sa densité. En même temps cette invariabilité exprime encore l'impossibilité de charger d'électricité un corps isolant. Si ce fluide, ou un fluide analogue, existe dans les corps conducteurs, la loi de Faraday lui impose encore la même condition, c'est à dire celle que Fresnel a dû attribuer à l'éther lumineux".<sup>48</sup>

La condition d'incompressibilité du "fluide spécial", exprimée par la "loi de Faraday", constitue donc bien, le fondement de la théorie Maxwellienne des diélectriques selon Potier. Le statut de la charge électrique est laissé un peu vague, puisque Potier admet la possibilité

de l'existence de deux fluides, un pour les conducteurs et l'autre pour les diélectriques. Cette dualité de fluides sera, plus tard, reprise par Poincaré.

Nous voulons souligner que Potier passe ici de la conception d'un diélectrique se comportant comme un corps solide (analogie qu'illustre la proportionalité entre force et déplacement), à celle d'un diélectrique assimilé à un fluide (analogie qu'illustre la condition d'incompressibilité et l'hypothèse que tous les courants sont fermés). Potier ne semble donc pas voir dans ces analogies un quelconque reflet de la nature du milieu électromagnétique. Il trouve d'ailleurs légitime qu'on fasse des hypothèses différentes sur la structure de l'éther, selon le phénomène particulier qui serait à expliquer.<sup>49</sup>

L'objectif de Potier n'est sûrement pas de discuter les fondements de l'électrostatique de Maxwell, mais plutôt d'introduire les principales hypothèses en vue de la présentation de la théorie électromagnétique de la lumière. Pour la développer, il a surtout besoin d'affirmer l'identité des courants de conduction et de déplacement vis à vis des actions magnétiques et électrodynamiques:

"L'expérience montre que des forces électromotrices naissent de la variation des courants. Par conséquent, dans la substance d'un diélectrique placé dans le voisinage d'aimants ou de courants, l'intensité des courants, en un point quelconque, dépend des variations non seulement des aimants et courants qui circulent dans ce diélectrique".<sup>50</sup>

Ici encore Potier étonne par le naturel avec lequel il affirme que les courants de déplacement sont équivalents, par leurs effets, aux courants de conduction. Le fondement de cette généralisation semble être la proposition initiale de l'article, selon laquelle les courants se ferment à travers le diélectrique, ce qui légitimerait une extension, aux courants de déplacement, des propriétés des courants de conduction. Ce raisonnement ne prouve évidemment rien, comme nous avons déjà signalé et, en plus, ne correspond vraisemblablement pas à une quelconque "intuition" chez Maxwell.

A partir de cette hypothèse et de la définition de la grandeur

"état électrotonique", Potier pose les trois ensembles d'équations de Maxwell et déduit les équations d'une onde électromagnétique. Cette déduction est classique et ne présente pas un intérêt particulier.

La comparaison entre la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques, donnée par la mesure du rapport des unités électriques, et la valeur de la vitesse de la lumière, est considérée comme le terrain expérimental où la théorie électromagnétique de la lumière pourra être testée :

"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".<sup>51</sup>

Potier ne présente aucune des autres conséquences testables de la théorie électromagnétique de la lumière, comme la relation entre l'indice de réfraction et les propriétés électriques et magnétiques du milieu.

Sa reconstruction du rôle de l'égalité entre la mesure du rapport des unités et celle de la vitesse de la lumière, dans la genèse de la théorie de Maxwell rejoint, à la fin de l'article, la seule instance expérimentale où elle peut être testée.

L'article de Potier a donc le caractère d'un exposé dogmatique de la théorie électromagnétique de la lumière. Il n'y a aucune discussion critique de ses fondements, ni de tentative de la comparer à d'autres théories de la lumière. Nous croyons que cela montre qu'en 1873 l'histoire de la réception des théories de Maxwell en France n'en était qu'à ses débuts.

Les critiques du compte rendu de Bertrand relèvent, autrement, d'une résistance encore trop diffuse et générale, et ne font que confirmer cette thèse.

L'analyse que nous ferons, dans le prochain chapitre, de la place des théories de Maxwell dans l'enseignement scientifique en France, fournira des nouveaux éléments pour l'étayer.

## C H A P I T R E I I I

### LA RECEPTION DES THEORIES DE MAXWELL ET L'ENSEIGNEMENT SCIENTIFIQUE EN FRANCE

-----

SECTION III.1- LES LECONS DE MASCART AU COLLEGE DE FRANCE	p.58
- Le Chapitre sur les Diélectriques	p.62
- L'Electromagnétisme	p.68
- Mascart et le Congrès des Electriciens de 1881	p.72
SECTION III.2- LES COURS DE JAMIN A L'ECOLE POLYTECHNIQUE	p.74
- Les Théories de Maxwell dans les Cours de Jamin	p.77
SECTION III.3- LES COURS DE POTIER A L'ECOLE POLYTECHNIQUE	p.83
- L'Enseignement Scientifique et la Réception des Théories de Maxwell en France dans les années 80	p.89

Dans ce chapitre nous allons examiner des sources primaires ayant une caractéristique commune: être le registre de cours de physique donnés dans des établissements d'enseignement en France au XIX<sup>ème</sup> siècle.

Nous devons poser la question de l'utilité de ce type de source pour l'historiographie des sciences. Il est certain qu'un cours de physique ne renseigne pas l'historien de la même façon que, par exemple, des mémoires et articles publiés dans des revues spécialisées. Ces différentes sources ne reflètent pas, de la même façon, la dynamique de la recherche scientifique. La question n'est cependant pas commode à traiter, puisqu'elle suppose une connaissance du caractère de l'enseignement scientifique, qui peut changer essentiellement d'une institution à une autre et, surtout, d'une époque à une autre. Nous nous limiterons ici à faire quelques réflexions générales sur ce sujet, qui n'a pas encore reçu l'attention qu'il mérite de la part des historiens des sciences.

Une différence qui nous semble essentielle entre les types de sources primaires citées plus haut, concerne le public auquel elles s'adressent. Ainsi, nous pouvons supposer qu'un cours de physique s'adresse à un public beaucoup plus large, et qu'il constitue un indice d'une diffusion du savoir plus importante que celle résultante de la publication d'un article dans une revue spécialisée.

Il nous semble également légitime d'admettre que la véhiculation d'un savoir par un cours de physique est, également, un indice du degré d'acceptation, par la communauté scientifique, de ce savoir.

Kuhn offre quelques réflexions sur la fonction des manuels d'enseignement scientifique, qui nous semblent suffisamment intéressantes pour les rappeler ici brièvement.

D'après l'auteur de La Structure des Révolutions Scientifiques<sup>1</sup> la formation des futurs chercheurs dans des disciplines comme la physique

présente un trait particulier: celui de faire appel à des "manuels", au lieu d'utiliser la littérature originale du domaine étudié. Kuhn retrace, ainsi, l'origine des manuels d'enseignement aux débuts de l'activité scientifique "normale", marquée par l'émergence du premier "paradigme" dans un certain domaine d'investigation.

L'apparition du premier "paradigme" a comme conséquence un changement dans le caractère des communiqués et des comptes-rendus de recherche. Ceux-ci deviennent beaucoup plus spécialisés puisqu'ils présupposent implicitement le "paradigme" accepté par la communauté scientifique. Ces communiqués laissent aux manuels la tâche d'exposer les fondements "paradigmatiques" nécessaires à leur compréhension.

Les manuels d'enseignement jouent ainsi un rôle fonctionnel dans l'activité scientifique telle que Kuhn la voit. Ils sont des instruments efficaces pour introduire de nouveaux chercheurs dans le cadre de la tradition "normale" d'une certaine spécialité. Cette fonction rend les manuels responsables, selon Kuhn, de l'image que se font les scientifiques du développement de leur discipline. Puisque les manuels ne se destinent qu'à introduire le futur scientifique dans une tradition de science normale, ils sont ré-écrits à la fin de chaque révolution scientifique et exposent le dernier "paradigme" accepté unanimement par les spécialistes. Les manuels donnent ainsi l'impression, par la sélection du savoir qu'ils supposent, que le passé débouche directement sur le présent, et que le développement des sciences est linéaire et cumulatif.

Nous avons déjà souligné, dans l'introduction de ce travail, l'écart qui existe entre le modèle Kuhnien du développement des sciences, et la réalité de ce développement au XIX<sup>ème</sup> siècle. Il serait, également, problématique de caractériser les registres des cours de physique du XIX<sup>ème</sup> siècle en France, de la même façon que le fait Kuhn en ce qui concerne les "manuels d'enseignement". Les premiers reflètent, effectivement, beaucoup plus la dynamique scientifique de leur époque que le font les manuels d'aujourd'hui, en problématisant fréquemment le savoir qui est véhiculé. Les cours du XIX<sup>ème</sup> siècle faisaient souvent état des recherches menées à l'époque, comme montrent par exemple ceux faits par Poincaré à la Sorbonne.<sup>2</sup>

Les registres de cours du XIX<sup>ème</sup> siècle traitent aussi, dans certains cas, des différentes théories qui se rapportent à une même classe de phénomènes. Ils ne peuvent donc pas être décrits comme des simples manuels qui visent l'initiation à un "paradigme" unique. A ce propos donc, ils se rapprochent plus des comptes-rendus de recherches "de pointe" de l'époque, que ne le font les manuels d'enseignement d'aujourd'hui.

Nous verrons ainsi, dans ce chapitre, que les théories de Maxwell étaient enseignées en France dès le début des années 80, sans qu'il existe encore un consensus dans la communauté scientifique au sujet de leur validité.

Il nous semble donc légitime de chercher dans ces types de sources, non seulement des indications sur le degré de diffusion d'un certain savoir dans la communauté scientifique, mais également sur le degré et sur la forme d'assimilation de ce savoir dans la recherche elle-même. Il est, toutefois, certain que les renseignements éventuellement obtenus doivent être enterminés par une analyse d'autres types de sources primaires.

Dans ce chapitre nous examinerons les cours de Mascart faits au Collège de France, les cours de Jamin et ceux de Potier faits à l'Ecole Polytechnique. Nous nous proposons de mettre en évidence la place qu'y est assignée aux théories de Maxwell en électricité et magnétisme et, de cette façon, caractériser une phase de la réception de ces théories en France.

SECTION III.1- LES LECONS DE MASCART AU COLLEGE  
DE FRANCE

E. Mascart<sup>3</sup> a une place remarquable dans l'histoire de la réception en France des théories de Maxwell, par ses Leçons sur l'Electricité et le Magnétisme, publiées en 1882 avec la collaboration de Joubert. L'importance de cet ouvrage dans le contexte de l'enseignement scientifique en France est considérable, d'après son biographe Paul Janet :

"Ce livre venait à son heure; pendant plus d'un demi-siècle l'enseignement de l'Electricité en France en était resté aux travaux de Coulomb et d'Ampère; Verdet, il est vrai, dans son enseignement de l'Ecole Normale, avait réagi contre cette tendance et tenté de faire connaître les travaux étrangers; mais les cours de Verdet étaient déjà bien loin, et que de travaux, que d'idées nouvelles avaient été accumulés depuis par les Maxwell, les Kelvin et les Helmholtz ! C'est cette oeuvre considérable que Mascart et Joubert entreprirent de fondre dans une vaste synthèse, en la reliant aux bases immortelles jetées par Coulomb, Ampère et Faraday".<sup>4</sup>

La production scientifique de Mascart s'est concentrée dans le domaine de l'Optique. Il travaille initialement en spectroscopie. Ses travaux sur la dispersion de la lumière lui valent le Prix Bordin de l'Académie en 1866. Son travail le plus important a porté sur le sujet proposé pour le Grand Prix des Sciences Mathématiques de l'Académie des Sciences en 1870 : "Rechercher expérimentalement les modifications qu'éprouve la lumière dans son mode de propagation et ses propriétés par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur!" Dans le rapport de l'Académie sur le sujet choisi, nous lisons notamment:<sup>5</sup>

"Aujourd'hui que les mouvements vibratoires de la lumière et l'existence de l'éther lumineux lui-même sont considérés par tous comme des vérités bien établies, il paraît d'un grand intérêt de diriger nos recherches vers les propriétés de ce milieu élastique et ses relations avec la matière pondérable".

De cet extrait il se dégage que le problème était posé dans

le contexte du programme éther-élastique des théories de la lumière.

La recherche expérimentale<sup>6</sup> que Mascart a entreprise sur plusieurs phénomènes optiques, a été concluante : aucune influence n'a pu être observée comme conséquence du mouvement de la terre. Il a utilisé comme théorie interprétative la théorie de la lumière de Fresnel, à laquelle il a apporté des modifications concernant son application au phénomène de la double réfraction.

Mascart a obtenu en 1874, pour cette recherche, le prix offert par l'Académie. Sa recherche expérimentale peut être envisagée dans la perspective du "problème de l'éther", c'est à dire celui de la détection d'effets du mouvement relatif supposé entre l'éther et la terre, contexte dans lequel se situent aussi les expériences de Michelson et Morley. Ce problème n'a été résolu qu'avec la théorie des électrons de Lorentz.<sup>7</sup>

L'intérêt pour l'électricité et le magnétisme est tardif chez Mascart, et ses Leçons<sup>8</sup> constituent sûrement une importante contribution dans ce domaine.

Les leçons de Mascart au Collège de France, qui ont servi de base à l'ouvrage de 1882, ont été la première tentative en France d'enseigner l'électricité et le magnétisme en faisant appel d'une façon systématique à l'approche de Maxwell. L'entrée des théories de Maxwell dans l'enseignement français est donc bien tardive, si l'on songe à la date de publication du Treatise (1873).

L'ouvrage de Mascart et Joubert précède, néanmoins, de deux ans la traduction française du Elementary Treatise, et de trois ans celle du premier volume du grand Treatise de Maxwell. Les leçons de Poincaré sur les théories de Maxwell, données à la Sorbonne, suivent d'au moins six ans celles de Mascart.

Ces données chronologiques montrent d'une façon indéniable, à notre avis, l'importance de cet ouvrage dans la réception des théories de Maxwell en France.<sup>9</sup>

Nous allons par la suite tenter de déterminer quelle place Mascart et Joubert accordent aux théories de Maxwell dans les Leçons.

La préface des Leçons ne laisse pas de doute sur les intentions des auteurs :

"Nous avons cherché à mettre en relief les vues profondes introduites dans la science par Faraday, et si heureusement développées par Clerk Maxwell, sur la considération des lignes de force et sur le rôle d'un milieu intermédiaire dans les actions électriques et magnétiques. Cette conception jette un grand jour sur les relations qui existent entre les divers ordres de phénomènes et a donné naissance à une théorie de la lumière tout à fait imprévue".

Les notions de "ligne de force" et de "tube de force" sont introduites dès le deuxième chapitre, consacré à la théorie du potentiel électrostatique. Nous devons souligner l'importance qu'acquiert, dans ce contexte, l'analogie avec le mouvement d'un fluide incompressible. Les principaux théorèmes de l'électrostatique sont traduits dans le langage de cette analogie.

Dans le chapitre IV Mascart et Joubert développent l'analogie entre les problèmes d'équilibre électrique et ceux de la propagation de la chaleur. L'analogie hydrodynamique entre un diélectrique et un liquide incompressible sans frottement est également mise en évidence.

Ces analogies jouent soit le rôle d'illustrations de certaines notions, comme celle de "flux de force", ou alors d'outils permettant de transporter la solution d'un problème mathématique résolu dans un domaine, à un autre domaine. Ces analogies sont encore dépourvues de signification physique particulière.

Les auteurs se situent donc, jusqu'au chapitre V, dans le seuil épistémologique établi par le premier mémoire de Maxwell, où les analogies physiques sont utilisées pour "donner corps" mathématique à certaines notions, comme celle de "ligne de force".

Ce seuil est franchi au début du chapitre VI de la première partie des Leçons, consacré à l'étude des diélectriques :

"Jusqu'ici nous avons raisonné dans l'hypothèse que les actions s'exercent à distance entre les masses électriques, et considéré le diélectrique comme un milieu inerte à travers lequel agissent les forces, mais dénué par lui-même de toute propriété active.

D'un autre côté, il paraît aujourd'hui bien démontré que la chaleur est un mouvement vibratoire dont la propagation s'effectue par l'intermédiaire d'un milieu élastique; or nous avons vu que le problème de l'équilibre électrique et celui de la propagation de la chaleur dans l'état permanent sont définis par les mêmes propriétés mathématiques.

N'est-il pas permis de supposer que dans les deux cas l'analogie est plus intime, qu'elle se poursuit jusque dans le mécanisme des actions élémentaires, et qu'il n'y a d'autre différence dans les deux ordres de phénomènes que celles que nous introduisons nous-mêmes dans l'interprétation physique des lois? S'il en est ainsi, la production des forces électriques doit pouvoir s'expliquer par la seule action du milieu.

Telle est l'idée que Faraday a cherché à mettre en lumière et qui l'a guidé constamment dans ses travaux. Il n'y a pas lieu de chercher ici à démontrer ou infirmer l'exactitude de l'un ou de l'autre de ces points de vue, mais seulement leur équivalence pour l'explication des phénomènes".<sup>10</sup>

Dans son Traité d'Electricité Statique (1876), Mascart était un partisan de l'approche d'action à distance. Il n'y a aucune référence à Maxwell, et la notion de "lignes de force" de Faraday y est présentée comme un instrument utile dans la "représentation" des phénomènes. L'idée selon laquelle l'influence électrique se transmet par le milieu — ce que Faraday croyait être une conséquence de certaines de ses expériences — n'est pas considérée comme une alternative aux explications fondées sur l'action à distance. En 1876 Mascart épousait donc des idées semblables à celles de Bertrand. Entre ce Traité et les Leçons il y a, il nous semble, un net changement d'attitude, même si dans le passage que nous venons de citer les auteurs signalent qu'il s'agira d'exhiber l'équivalence des deux approches de l'électrostatique, et non pas de prendre le parti de celle de Faraday et Maxwell. Nous croyons qu'une plus grande vraisemblance accordée à la théorie électromagnétique de la lumière entre 1876 et 1882 a été responsable de ce changement de sensibilité à l'intérieur de l'électrostatique.

Le Chapitre sur les Diélectriques

La démarche suivie par Mascart et Joubert dans le ch.VI des Leçons se fait en quatre temps :

- a) D'abord les auteurs accomplissent le passage de l'approche d'action à distance à celui d'action contigüe, en ce qui concerne l'interaction mécanique entre des systèmes électrisés.
- b) Ensuite ils obtiennent l'expression de l'énergie d'un système électrique en supposant que le siège de cette énergie est le milieu diélectrique. L'état de contrainte supposé dans le milieu peut alors être exprimé en fonction de cette énergie.
- c) Ils développent alors la théorie des diélectriques, à partir de l'hypothèse d'une polarisation ayant lieu dans ces milieux.
- d) Finalement ils exposent la théorie du déplacement électrique.

Cette division prétend mettre en évidence les clivages logiques et conceptuels de ce chapitre, comme nous tâcherons de le montrer par la suite.

a) Mascart et Joubert reproduisent dans un premier temps, le raisonnement de Maxwell dans les paragraphes 103 à 108 du chapitre V de la première édition du Treatise. Les forces électrostatiques sont considérées comme des effets d'une action contigüe du milieu sur les corps électrisés :

"La force réelle qui agit entre les deux surfaces électrisées  $S_1$  et  $S_2$  peut être considérée comme provenant des ac-

tions élémentaires qui s'exercent directement et à distance entre les différentes masses électriques qui les recouvrent, prises deux à deux. C'est l'hypothèse qui a servi de base à tous nos calculs jusqu'à présent. Mais on peut admettre ainsi que cette action se transmet par l'intermédiaire du milieu ambiant en vertu d'une élasticité spéciale, comme le croyait Faraday. Nous plaçant à ce point de vue, nous allons examiner les conditions auxquelles doit alors satisfaire le milieu intermédiaire".<sup>12</sup>

Nous voudrions souligner que Maxwell a complètement modifié la manière d'aborder le sujet à partir de la 2<sup>ème</sup> édition du Treatise (1881). Il ne fait alors plus appel à l'idée de tube de force, et le passage de la théorie d'action à distance des force électrostatiques à celle d'action contigüe, s'effectue d'une façon plus abstraite et générale. Mascart et Joubert semblent donc, préférer les développements de la 1<sup>ère</sup> édition qui sont d'ailleurs plus en accord avec la place qu'il assigne, depuis le début des Leçons, aux notions de "ligne" et de "tube de force". Cette même approche est maintenue dans la 2<sup>ème</sup> édition des Leçons (1896).

L'enjeu est moins secondaire qu'il ne semble à première vue, et concerne la place assignée à la notion de ligne de force — qui a changée tout au long de l'oeuvre de Maxwell<sup>13</sup> et a son rôle dans la réception de ses théories. Nous croyons que le chapitre VI des Leçons présente, à cet égard, une dualité entre l'approche de "ligne de force" et celle de "polarisation", ce qui nuit à la cohérence de l'ensemble (voir c) plus bas).

b) Ensuite les auteurs expriment l'énergie électrostatique en fonction des paramètres qui traduisent l'état de contrainte du milieu selon la théorie de l'action contigüe.

Ils soulignent que "dans cette manière de voir, toute l'énergie du système électrique doit résider dans le milieu diélectrique".<sup>14</sup> Ils tâchent de montrer que l'expression obtenue est compatible avec celle fournie dans l'hypothèse où l'action s'exerce à distance entre les "masses électriques".

c) L'équivalence démontrée jusqu'ici entre les deux approches de l'électrostatique ne permet donc pas de se décider pour l'une d'entre elles.

Les auteurs des Leçons sont de l'avis que la découverte du rôle actif joué par les diélectriques ne conduit pas nécessairement à préférer l'approche d'action contigüe, comme le croyait Faraday :

"Si l'expérience de Faraday est impuissante à trancher la question des actions à distance ou au contact, elle met en évidence le rôle actif joué par le milieu dans les phénomènes électriques. On est ainsi conduit à admettre que, sous l'influence électrique, le milieu prend un état de polarisation analogue à celui qu'on constate dans le fer doux sous l'influence d'un aimant".<sup>15</sup>

Déjà dans son Traité d'Electricité Statique où, comme on l'a signalé, Mascart se maintient dans la perspective d'action à distance, le rôle actif du milieu isolant est considéré en supposant une polarisation des ses éléments:

"Cette découverte de Faraday a vivement frappé les physiciens, dont quelques-uns étaient arrivés à révoquer en doute toutes les théories antérieures.

(...) L'idée que les forces électriques, et même plus généralement toutes les actions naturelles, ne peuvent s'exercer entre deux corps que par l'intervention du milieu interposé, paraît avoir acquis une grande faveur depuis quelques années; mais, sans qu'on puisse affirmer ou nier une telle hypothèse qui touche à la nature intime des phénomènes physiques, il importe de remarquer qu'au moins pour les phénomènes électriques, cette conclusion n'est pas une conséquence nécessaire des découvertes de Faraday. Tous les faits observés par ce physicien peuvent s'expliquer facilement par les actions à distance, en faisant intervenir l'électrisation des milieux isolants".<sup>16</sup>

La démarche des Leçons consiste toujours à adopter cette théorie de la polarisation diélectrique de Poisson-Mossotti (Voir Appendice A). En ce qui concerne les diélectriques les Leçons s'éloignent donc de l'esprit du Treatise qui a inspiré les parties a) et b) exposées plus haut. Nous verrons que dans la partie d) du chapitre VI

Mascart revient à l'approche du Treatise, en exposant la théorie du déplacement électrique; mais aucune tentative n'est faite pour la rattacher à la théorie de la polarisation.

Nous voyons coexister dans les développements théoriques de la partie c) , d'un côté les concepts qui ont permis d'effectuer le passage de l'approche d'action à distance à celle d'action contigüe, et de l'autre côté ceux de la théorie de Poisson-Mossotti, qui sont étrangers à la théorie de Maxwell.

Dès le départ Mascart et Joubert font appel à l'hypothèse de Poisson-Mossotti :

"Cette hypothèse consiste à admettre que le milieu magnétique ou diélectrique est formé de particules sphériques par exemple, absolument conductrices, disséminées dans un milieu non conducteur".

Une théorie fondée sur cette hypothèse et sur l'idée que les actions électrostatiques se transmettent à distance, permet de déduire que les effets de cette polarisation sont identiques à ceux de deux nappes "fictives" d'électricité, placées sur les deux faces du diélectrique.<sup>17</sup>

A partir de cette théorie on peut déduire notamment l'équation de Poisson pour les diélectriques, et l'équation caractéristique pour la surface de séparation de deux diélectriques ayant des capacités inductives différentes.<sup>18</sup>

Une autre conséquence de la théorie de Poisson-Mossotti concerne le rapport entre la couche de charge "fictive" sur la surface du diélectrique, et la couche "vraie" sur la surface d'un conducteur contigüe (comme, par exemple, dans un condensateur). Si l'on désigne par  $\sigma_d$  et  $\sigma_c$  les densités superficielles de charge sur le diélectrique et sur le conducteur respectivement, la théorie de la polarisation diélectrique permet d'obtenir :

$$\sigma_d = \sigma_c \left( 1 - \frac{1}{\mu_1} \right) ,$$

où  $\mu_1$  est le pouvoir inducteur spécifique du diélectrique. Ces

deux couches de charge ont des signes opposés.

d) Dans l'exposition qu'offrent Mascart et Joubert de la théorie du déplacement électrique, les développements que nous venons d'exposer sont laissés de côté. Les Leçons reproduisent alors, sans aucun souci critique, les propos de Maxwell.

La théorie du déplacement électrique est présentée comme une tentative (. . .)

"... d'expliquer les propriétés des diélectriques et rendre compte des phénomènes par la seule intervention du milieu ..."

Le déplacement électrique serait un phénomène équivalent à un "GLISSEMENT d'électricité dans le sens de l'induction": un déplacement d'électricité POSITIVE qui a lieu dans le milieu diélectrique allant du conducteur chargé positivement vers le conducteur chargé négativement.

Les auteurs établissent le même rapport que Maxwell entre les concepts de déplacement, de polarisation et d'électrisation des conducteurs :

"C'est le déplacement produit par l'induction à travers la masse entière du diélectrique qui détermine la polarisation du milieu et l'électrisation apparente des conducteurs".<sup>19</sup>

La distinction entre charge "vraie" des conducteurs et charge "fictive" des diélectriques est abandonnée et les auteurs reprennent la théorie de la charge du Treatise :

"Il est évident que, puisque l'électrisation du conducteur n'est qu'apparente, toute l'énergie due à l'électrisation doit résider dans le milieu".

Nous ne voyons non plus, de tentative pour concilier l'idée d'un déplacement de charge "positive" avec la théorie que toute charge est le produit de la polarisation :

"Considérons un tube d'induction entre deux conducteurs. Dans toute l'étendue du tube, le déplacement est constant: chaque section orthogonale est traversée par la même quantité d'électricité. A l'une des extrémités, le déplacement s'est fait du conducteur vers le diélectrique, l'élément correspondant  $dS$  du conducteur est dit alors chargé d'électricité positive avec une densité  $\sigma$ ; à l'autre extrémité le déplacement s'est fait du diélectrique vers le conducteur, l'élément correspondant  $dS'$  est chargé avec une densité  $-\sigma'$ ".<sup>20</sup>

Selon les auteurs la théorie du déplacement réussit à rendre compte des phénomènes observés et suggère des conséquences "inattendues" dans le domaine de l'Optique :

"Elle fournit une interprétation physique du pouvoir inducteur spécifique de Faraday : [il] est à un facteur près,  $\frac{1}{4\pi}$ , l'inverse du coefficient d'élasticité électrique du milieu.

Elle donne l'explication de cette vue de Faraday qu'il n'est pas possible de communiquer à la matière une charge absolue d'électricité: en effet, dans cette théorie, l'électricité se comporte comme un fluide incompressible; la quantité qui peut être contenue dans une surface fermée est invariable, et la production de deux quantités d'électricité égales et de signes contraires apparaît comme la conséquence d'un seul et même phénomène.

Enfin il est naturel de penser que, si l'explication des phénomènes électriques entraîne l'existence d'un milieu incompressible, répandu dans tout l'espace, ce milieu ne saurait être différent de l'éther auquel on attribue les phénomènes lumineux et calorifiques; cette théorie permet donc d'entrevoir entre les deux ordres de phénomènes une dépendance dont la confirmation serait une des conquêtes les plus importantes de la physique".<sup>21</sup>

L'exposition de la théorie du déplacement électrique présente donc un caractère autonome à l'intérieur du chapitre, et se rattachera plutôt à la théorie électromagnétique de la lumière, dont l'exposition est l'un des objectifs des Leçons.

La première tentative en France de présenter une exposition cohérente de l'électrostatique de Maxwell, englobant sa théorie des pressions et des tensions dans le milieu, sa théorie du déplacement électrique et sa théorie de la charge sera due à E. Mathieu en 1885.

L ' E l e c t r o m a g n e t i s m e

Mascart et Joubert introduisent également les conceptions de Maxwell dans la quatrième partie des Leçons, consacrée à l'électromagnétisme.

Les actions électrodynamiques y sont étudiées de la façon traditionnelle, c'est à dire à partir des principales formules qui, depuis Ampère, ont été proposées pour la force entre deux éléments de courant, supposés interagir à distance. Mascart discute longuement la formule de Reynard (voir le chapitre précédent) et signale sa spécificité par rapport à la formule d'Ampère :

"... nous n'avons plus ici une action et une réaction égales et opposées, mais sur chacun des deux éléments une action différente, dirigée normalement à cet élément et dans le plan déterminé par l'autre élément.

L'existence d'une force normale à l'élément est incompatible avec l'idée d'une action à distance; mais si l'on en envisage, au contraire, les forces électrodynamiques comme le résultat d'une modification dans les propriétés élastiques du milieu, on conçoit aisément que la réaction de ce milieu sur un élément de courant puisse être normale".<sup>22</sup>

Effectivement, la formule d'Ampère est la seule compatible avec la condition que la force électrodynamique est dirigée suivant la droite qui joint les deux éléments.

Toutefois les auteurs ne cherchent aucunement à exposer des tentatives théoriques, comme celles de Reynard ou de Maxwell, pour déduire l'action électrodynamique à partir d'hypothèses sur la nature du milieu (ou de son état de contrainte). Mascart et Joubert ne font pas référence non plus, à l'application des équations de Lagrange à l'étude d'un système de courants, méthode conçue par Maxwell et exposée dans la quatrième partie de son Treatise.

Dans le chapitre sur l'induction électromagnétique les auteurs suivent, fondamentalement, le raisonnement de Helmholtz et de W. Thomson, basé sur le principe de conservation de l'énergie. Il y a

néanmoins une tentative pour traduire les lois de l'induction dans le langage de Faraday fait de lignes et flux de force:

"On peut considérer comme une règle générale que toute variation du flux de force dans un circuit, quelle qu'en soit l'origine, correspond à une variation de l'énergie potentielle et donne lieu à la même force électromotrice d'induction que si elle était produite par le déplacement d'un système magnétique extérieur.

Cette coïncidence apparaît surtout comme nécessaire, si, abandonnant l'idée des actions à distance, on considère la transmission des forces électriques et magnétiques comme due à une modification des propriétés élastiques du milieu intermédiaire; on comprend alors que la seule cause prochaine des courants induites dans un conducteur puisse être l'état du milieu où il est plongé, quelle que soit l'origine des forces qui agissent dans ce milieu".<sup>23</sup>

Quand Mascart et Joubert obtiennent l'expression pour l'énergie intrinsèque des courants électriques, ils évitent, cependant, de se prononcer sur la nature de cette énergie ou sur son siège :

"On ne peut dire, par exemple, si elle existe à l'état d'énergie potentielle ordinaire, comme serait la tension d'un corps élastique, ou d'une énergie actuelle, consistant dans le mouvement d'un fluide particulier, ou bien encore sous les deux formes à la fois; ni si elle est localisée dans le circuit traversé par le courant ou, suivant les idées de Faraday et de Maxwell, répandue dans le milieu tout entier!"<sup>24</sup>

Le passage à l'approche de Maxwell s'effectue seulement dans le chapitre VI de la quatrième partie des Leçons ayant comme titre "Propriétés du champ électromagnétique":

"Les considérations qui précèdent suffisent, comme on l'a vu, pour rendre compte de tous les phénomènes d'induction dans les conducteurs linéaires; mais il est utile d'envisager le problème d'un autre point de vue, qui permettra de mettre en relief l'intervention du milieu, comme on l'a fait déjà en électrostatique".<sup>25</sup>

Dans ce chapitre les auteurs introduisent les équations pour le champ électromagnétique, à la manière du mémoire DT de Maxwell.

L'induction magnétique est exprimée en fonction des composantes de l'état électrotonique. La force électromotrice d'induction peut ainsi être obtenue par la dérivée temporelle de l'état électrotonique. Ce passage rappelle les réflexions de Maxwell dans le mémoire FA , où à la méthode "artificielle" fondée sur le concept d'induction magnétique qui traverse un circuit, il oppose celle fondée sur l'état électrotonique du circuit. Cette dernière méthode répondrait à l'exigence que les actions soient transmises de proche en proche.

Mascart et Joubert montrent également dans ce chapitre, que l'énergie d'un système de courants peut être exprimée de deux façons , soit qu'on considère son siège comme étant les courants électriques, soit le milieu qui les entoure :

"Dans le premier cas, l'action réciproque des courants est considérée comme s'exerçant directement à distance ; dans le second cas, cette action résulte de l'élasticité du milieu intermédiaire".<sup>26</sup>

La "correction" des équations pour les courants électriques, par l'inclusion des courants de déplacement, s'accomplit sans commentaires particuliers.

Le dixième chapitre des Leçons , sur les "Théories Générales" semble le plus intéressant, parce qu'il comprend en particulier , une exposition de la théorie électromagnétique de la lumière.

Mascart et Joubert soutiennent que les spéculations d'Ampère avaient été "reprises" par Weber et Maxwell.<sup>27</sup> Il se réfèrent à certains passages du mémoire de 1822, où Ampère pose l'idée que l'action électrodynamique pourrait être expliquée par l'intermédiaire d'un milieu éthérée, et où il spécule également sur la nature du fluide électrique, qui serait selon lui composé de "molécules électriques".

Dans la première partie du chapitre X, les auteurs des Leçons exposent l'électrodynamique de Weber qui utilise, justement, l'hypothèse de Flechner selon laquelle le courant électrique serait un mouvement de charges électriques.<sup>28</sup>

Ils font aussi référence aux théories qui se sont inspirées de l'opinion de Gauss, à savoir que les actions électriques ne se pro-

pagent pas d'une façon instantanée. Dans cet ordre d'idées ils rangent d'une part les théories de Betti, de B. Riemann et C. Neumann, et d'autre part celles de Lorenz et d'Eddington. Pour les auteurs ces théories ont en commun la supposition de l'existence d'un milieu :

"... car, si un effet mécanique quelconque, force ou potentiel, se transmet avec une vitesse finie d'une particule à une autre, il est nécessaire qu'un milieu de structure convenable en ait été le siège pendant que cet effet a quitté la première particule et n'a pas encore atteint la seconde".<sup>29</sup> Ils se font ici l'écho des réflexions de Maxwell dans le § 865 du Treatise.

La majeure partie du chapitre est consacrée à l'exposition de la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell. Cette théorie répond, selon les auteurs, à "l'exigence philosophique" de limiter la prolifération du nombre de milieux différents supposés pour l'explication, par exemple, des phénomènes lumineux et électromagnétiques :

"Le grand problème que soulève la philosophie de la science est donc de connaître la constitution d'un milieu unique qui permette d'expliquer en même temps tous les phénomènes physiques. Si le calcul montre que les perturbations électromagnétiques se propagent, non seulement dans l'air, mais dans tous les corps, avec la vitesse de propagation de la lumière, la question aura déjà fait un grand pas, car il sera démontré que ce milieu existe et que, selon toute probabilité, les phénomènes électriques et lumineux ne sont que des manifestations différentes des propriétés dont il est doué. Telle est la conséquence de la théorie de Maxwell. L'action, découverte par Faraday, d'un champ magnétique sur la polarisation de la lumière qui la traverse sera une conséquence naturelle du lien que le milieu commun établit entre les deux ordres de phénomènes".<sup>30</sup>

Mascart et Joubert reproduisent ensuite la théorie exposée dans le chapitre XX du 2<sup>ème</sup> volume du Treatise, où Maxwell obtient, à partir des équations du champ électromagnétique, l'équation d'une onde électromagnétique et établit les bases d'une nouvelle théorie de la lumière.

Il nous importe surtout ici, de rendre compte de la vraisemblance accordée à cette théorie par Mascart et Joubert. Ils signalent que "le véritable contrôle de cette théorie est que, dans tous les milieux la vitesse de propagation des perturbations magnétiques soit la même que la vitesse de la lumière".<sup>31</sup>

Comme la vitesse de l'onde électromagnétique est égale, d'après la théorie exposée, au rapport des unités de charge, il s'agit de comparer la mesure de ce rapport et la mesure de la vitesse de la lumière :

"Or, l'expérience indique pour ces deux vitesses des valeurs qui diffèrent extrêmement peu de 300,000 Km/sec. , et les travaux les plus récents s'accordent à donner des nombres d'autant plus voisins l'un de l'autre que les mesures ont été faites avec plus d'exactitude. Une pareille coïncidence ne peut être un effet du hasard, et la théorie ingénieuse de Maxwell trouve ainsi dans l'expérience une confirmation éclatante".<sup>32</sup>

Mascart et Joubert déduisent aussi la corrélation entre les propriétés optiques et les propriétés électriques du milieu, comme une autre conséquence testable de la théorie électromagnétique de la lumière. Ici ils signalent que l'accord avec l'expérience n'est pas total, et cette corrélation ne serait "qu'une première approximation d'une théorie qui reste à préciser davantage".

Les auteurs des Leçons restent toujours dans les voies ouvertes par le Treatise. Il n'y a aucune référence, par exemple, aux tentatives de tester certaines conséquences non directement optiques de la théorie de Maxwell, comme avait proposé l'Académie de Berlin en 1879 et qui a été à l'origine de la série d'expériences de Hertz.

Il est d'ailleurs remarquable qu'aucune allusion n'est faite dans les Leçons à l'électrodynamique de Helmholtz de 1870.

Mascart et le Congrès des Electriciens de 1881

Il serait peut-être opportun de rapporter ici qu'en 1881, il s'est tenu à Paris le "Congrès International des Electriciens", présidé par Mascart, et qui a réuni les plus importants scientifiques en ce domaine, parmi lesquels Helmholtz, Kirchhoff, Rowland, Fitzgerald, Rayleigh, W. Thomson, Tait, et l'élite scientifique française.

L'objectif du Congrès était celui d'adopter un système international d'unités électriques. Nous pouvons, cependant, supposer que parallèlement au Congrès, des échanges théoriques importants ont eu lieu, entre des personnalités si éminentes. Ainsi, même dans le cadre du Congrès, la question de la vérification expérimentale de la théorie électromagnétique de la lumière a été soulevée dans une note de Stoletov, où il souligne l'importance des mesures précises du rapport d'unités :

"Les rapports entre les unités correspondantes des deux systèmes s'expriment, on le sait, à l'aide d'une certaine VITESSE. D'après la théorie ébauchée par Clerk Maxwell et reprise par M. Helmholtz, elle serait la vitesse de la propagation des effets électromagnétiques dans le milieu où se font nos expériences (dans l'air), ou bien, ce qui est ici à peu près la même chose, dans le vide (l'éther). Or, tout porte à croire que cette vitesse n'est autre chose que la vitesse de la lumière, relation qui paraît exister aussi pour d'autres milieux diélectriques et qui constitue le point de départ d'une nouvelle branche de physique, l'électro-optique".<sup>33</sup>

Il est intéressant de souligner la référence que fait Stoletov à l'électrodynamique de Helmholtz de 1870, et sa liaison avec la problématique de Maxwell. Nous croyons que cette note met en évidence aussi le rôle central qui était attribuée à la vérification expérimentale de la théorie électromagnétique de la lumière.<sup>34</sup>

Nous pouvons donc considérer comme un fait sûr que Mascart était au courant de l'électrodynamique de Helmholtz de 1870 et de sa tentative de rendre compte des principaux résultats des théories de Maxwell. Il est donc étonnant que Mascart et Joubert n'y fassent aucune allusion dans les Leçons. Nous croyons pouvoir conclure de ces faits, d'abord que la théorie de Helmholtz était peu diffusée en France.

Et, en deuxième lieu, que les théories de Maxwell n'ont pas été introduites, en France, dans le contexte de l'électrodynamique de Helmholtz, une thèse retenue par plusieurs historiens des sciences.

SECTION III.2- LES COURS DE J. JAMIN A L'ECOLE POLYTECHNIQUE

J. Jamin<sup>35</sup> (1818-1886) a laissé son empreinte dans l'histoire de la physique en France non pas en tant que chercheur dans cette discipline, à laquelle il n'a pas adjoint des contributions importantes, mais en tant que professeur.

Jamin a enseigné à l'Ecole Polytechnique de 1852 à 1881, ses Cours ayant été publiés en quatre éditions, qui vont de 1858 jusqu'à 1906 (à partir de la 3<sup>ème</sup> édition, il a eu son élève Bouty comme collaborateur).

Les éditions successives des Cours couvrent donc toute la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, et constituent un tableau unique de l'état de l'enseignement de la Physique en France. D'où l'intérêt que ces Cours suscitent dans le contexte de notre étude: ils témoignent de l'assimilation, par l'enseignement, de l'évolution de la discipline pendant cette période, notamment dans le domaine de l'électricité et du magnétisme.

Jusqu'à la deuxième édition (1863-1869), les Cours de Jamin présentent un caractère trop élémentaire, et n'incorporent aucun des développements théoriques dont il est question dans ce travail. En particulier il n'y a aucune étude sur les diélectriques, ni non plus sur la théorie du potentiel.<sup>36</sup> Nous allons par la suite donner un aperçu de la place accordée aux théories de Maxwell dans la 3<sup>ème</sup> édition des Cours, et des modifications éventuellement apportées dans la 4<sup>ème</sup> édition.

Dans l'Introduction de ses Cours Jamin effleure quelques thèmes en épistémologie, dont nous allons essayer de considérer en tant qu'indications éventuelles de ses jugements de valeur à l'égard des théories de Maxwell.

Jamin ouvre l'Introduction par une apologie de l'observation et de l'expérience, considérées comme les méthodes fondamentales d'une certaine catégorie de sciences :

"Du moment que nous ne pouvons rien savoir A PRIORI sur le monde physique, il nous faut renoncer d'une manière absolue à l'habitude que nous prenons trop souvent d'accepter à titre d'explications des hypothèses auxquelles nous ne demandons que d'être possibles, et nous imposer la règle invariable d'étudier les phénomènes tels que nous les voyons se produire sans chercher à rien deviner des causes qui les déterminent ...".<sup>37</sup>

Le développement de l'expérimentation — auquel les alchimistes auraient beaucoup contribué, d'après Jamin — aurait permis de "collectionner" un grand nombre de phénomènes. Dans le domaine de la Physique les phénomènes auraient, d'abord, été "classés" par l'introduction de la notion de "force" :

"On y a reconnu cinq espèces particulières de forces: les actions mutuelles des corps, la chaleur, la lumière, l'électricité et le magnétisme".<sup>38</sup>

Ce "classement" a permis selon Jamin, la découverte des "lois" définies comme une "rélation constante entre des quantités variables".

Les mathématiques joueraient un rôle de langage et d'instrument de déduction et leur usage serait une mesure du degré de développement d'une science :

"Or, si toutes les lois élémentaires (...) d'une science quelconque étaient connues, on pourrait abandonner la marche expérimentale qui a servi à les découvrir, et en changeant de méthode, il n'y aurait plus qu'à descendre des principes à leurs conséquences".<sup>39</sup>

Un exemple d'une science arrivée à un tel degré de perfection serait la Mécanique Rationnelle. La plupart des sciences ne seraient cependant qu'au stade caractérisé par l'usage de "l'interprétation" :

"Or, s'il est évident qu'on peut logiquement descendre d'une cause connue à l'effet qu'elle détermine, il n'est pas moins clair que l'opération inverse est absolument dépourvue de règle et livrée à tous les hasards de l'interprétation".<sup>40</sup>

Le but de Jamin est celui d'attaquer "l'imagination des systèmes", comme ceux qui ont conduit à la multiplication des fluides, et qui seraient condamnés à être "désjoués" par le progrès des sciences".

Jamin arrive, néanmoins, à définir les conditions dans lesquelles on peut admettre certaines hypothèses en physique, comme celle de l'éther en Optique. En ce qui concerne les fluides il affirme :

"Bien que les physiciens modernes prennent pour se garantir autant de soins qu'en mettaient les anciens à les multiplier, ils en admettent cependant quelques-uns encore, mais à une condition, qui leur donne une véritable utilité à la condition qu'ils soient renfermés dans une hypothèse générale qui puisse embrasser mathématiquement toutes les lois expérimentales d'une science toute entière, et même en faire découvrir d'autres. Aussitôt que l'on a admis que la lumière est un mouvement vibratoire de l'éther, toutes les lois expérimentales deviennent des conséquences que l'on fait découler de l'hypothèse, et l'Optique arrive, à peu près, à cet état de perfection finale où l'expérience n'est plus qu'un auxiliaire qui vérifie les prévisions de la théorie, au lieu d'être l'unique moyen de rechercher les lois: c'est à ces caractères que l'on juge aujourd'hui les systèmes, c'est à cette condition qu'on les admet".<sup>41</sup>

Jamin se réfère ici, sûrement aux théories éther-élastiques de la lumière, nées à partir des recherches de Fresnel, et nous renseigne sur la haute crédibilité qui leur était accordée à cette époque (1878): C'est à partir des mêmes critères qu'il jugera la théorie électromagnétique de la lumière lors de la publication, en 1883, du quatrième volume de ses Cours.

Les Théories de Maxwell dans les Cours de Jamin

De la même façon que Mascart et Joubert dans les Leçons, Jamin va ranger les théories de Maxwell en électricité et magnétisme, ainsi que les théories de Weber, Riemann, Clausius, dans un chapitre portant sur les "Théories Générales" :

"Jusqu'ici nous nous sommes laissés guider pas à pas par l'expérience, et nous avons mis un soin scrupuleux à écarter toute hypothèse qui n'était pas rigoureusement indispensable à l'intelligence des phénomènes. Pour terminer notre étude, il nous reste à mettre en lumière diverses relations importantes, les unes démontrées par des principes certains, les autres établies à la faveur d'hypothèses plus ou moins probables sur la nature de l'électricité et ses relations avec la matière pondérable. Si ces dernières ne peuvent être considérées comme définitivement acquises à la Science, elles n'en sont pas moins utiles à connaître car elles ouvrent des voies nouvelles et curieuses à l'expérimentation; et de plus tout esprit philosophique sera satisfait de connaître les tentatives qui ont été faites pour réduire au minimum le nombre de mécanismes distincts nécessaires à l'explication du monde physique".<sup>42</sup>

Ce passage a été extrait de la 3<sup>ème</sup> édition des Cours. A partir de la 4<sup>ème</sup> édition (1891) les auteurs<sup>43</sup> le font suivre de réflexions inspirées de l'épistémologie de Poincaré, qui changent complètement la connotation "réaliste"<sup>44</sup> qui revêtait la notion de "mécanisme" ci-dessus. Après avoir souligné que les divers mécanismes proposées se fondent sur des hypothèses "parfois difficiles à concilier entre elles ou même absolument contradictoires", ils ajoutent :

"On ne peut manquer d'être frappé du nombre et de la variété des solutions mécaniques équivalentes que nos ingénieurs savent donner à un même problème pratique: souvent plusieurs d'entre elles remplissent si bien leur but qu'on serait embarrassé de dire laquelle il convient de préférer. Le nombre d'hypothèses possibles, c'est à dire le nombre des mécanismes distincts satisfaisant à un nombre donné de conditions fournies par l'expérience, est illimité. On

peut en fournir la preuve rigoureuse.<sup>45</sup> Dans l'impossibilité de se prononcer A PRIORI sur l'exactitude d'hypothèses équivalentes, on préférera les plus simples et les plus compréhensives, sauf à ne pas attacher une trop grande importance à leur valeur objective, toujours contestable, et à ne les apprécier que comme des instruments de recherche plus ou moins suggestifs".<sup>46</sup>

Les hypothèses auraient donc une simple valeur heuristique, en particulier celles qui supposent des "mécanismes" sous-jacents aux phénomènes observés.

Dans la 3<sup>ème</sup> édition le but, attribué aux théories physiques, de réduire le nombre de mécanismes, semble par contre accorder à ceux-ci un certain degré d'objectivité, la nature intime des phénomènes étant considérée comme mécanique.

Le "système" de Maxwell sera, en tout cas, accepté dans la mesure où il laisse présager une unification de deux domaines de la physique, ou une diminution du nombre d'hypothèses (dans ce contexte, le nombre d'éthers). C'est donc la théorie électromagnétique de la lumière qui rend crédible le "système", et non pas une nouvelle approche des phénomènes électriques et magnétiques, qui, en soi, ne ferait qu'augmenter le nombre de milieux :

"Pour expliquer les phénomènes électriques et magnétiques, nous avons eu recours à la conception d'actions exercées à distance par les molécules de fluides électriques imaginaires. Nous avons interprété les phénomènes lumineux à l'aide des vibrations d'un milieu élastique continu, l'éther, qui pénètre tous les corps et remplit l'espace vide de matière. D'ailleurs l'expérience de la rotation électromagnétique du plan de polarisation de la lumière nous a révélé l'existence d'une relation entre les phénomènes électromagnétiques et les phénomènes lumineux : il est donc naturel de chercher si les phénomènes électriques ne pourraient pas être rapportés eux-mêmes à une modification de l'éther, par exemple à des déformations élastiques convenablement choisies. C'est ce qu'a tenté Maxwell!"<sup>47</sup>

Dans la 4<sup>ème</sup> édition des Cours les auteurs suppriment la référence à l'éther dans ce passage, ce qui confirme l'affaiblissement de la conviction réaliste, à laquelle nous avons fait référence plus

haut. Les relations vérifiées expérimentalement entre les phénomènes lumineux et les phénomènes électromagnétiques conduiraient "naturellement" à "... chercher si les deux sortes de phénomènes ne seraient pas susceptibles d'une interprétation commune ..."<sup>48</sup> Il s'agit donc, maintenant, "d'interprétation commune" et non plus de "rapport" à un éther unique.

C'est donc par la connexion soupçonnée entre l'Optique et l'Electromagnétisme, que se légitimerait une révision de l'approche d'action à distance, jusqu'alors le paradigme explicatif dans ce dernier domaine.

En ce qui concerne les diélectriques Jamin introduit d'abord l'explication usuelle basée sur l'hypothèse d'une polarisation, et ensuite celle de Maxwell, basée sur l'hypothèse d'un déplacement électrique.

De la même façon que chez Mascart et Joubert<sup>49</sup>, l'équation caractéristique pour les diélectriques est obtenue en supposant une couche fictive de charge sur les surfaces du diélectrique, équivalente à la polarisation de celui-ci.

La théorie du déplacement de Maxwell fournirait selon Jamin, une explication de cette polarisation :

"Pour Maxwell, la polarisation d'un diélectrique n'est autre chose que le déplacement. Considérons un tube de force ou d'induction limité à deux conducteurs A et B. Le déplacement total a une valeur constante dans tout l'intérieur du tube. A l'une des extrémités A, par exemple, le déplacement s'opère dans le diélectrique, du conducteur A vers ce diélectrique. Tout se passe donc comme si une certaine quantité d'électricité positive était distribuée sur la surface de séparation du conducteur A et du diélectrique ; le conducteur A est dit ELECTRISÉ POSITIVEMENT. A la surface du conducteur B, le déplacement a lieu en sens contraire, c'est à dire du diélectrique vers le conducteur, et celui-ci est dit ELECTRISÉ NEGATIVEMENT. Ainsi l'électrisation apparente des conducteurs résulte du déplacement produit dans les diélectriques qui les limitent, et les deux électricités contraires apparaissent nécessairement en quantités égales, ce qui est conforme à tout ce que nous avons expérimentalement constaté jusqu'ici".<sup>50</sup>

Comme chez Mascart et Joubert, il n'y a, donc, aucune tentative de comparer la théorie de Poisson-Mossotti avec la théorie du déplacement électrique. Jamin admet, sans le prouver, que ces deux théories sont compatibles. En se gardant, par contre, de se prononcer au sujet du type de charge qui se déplace, il évite l'incohérence que nous avons signalée chez les deux auteurs des Leçons.

Dans la 4<sup>ème</sup> édition Jamin et Bouty suppriment les références à la théorie de la polarisation de Poisson-Mossotti.<sup>51</sup> La théorie du déplacement électrique reste le seul fondement de la théorie des diélectriques. Ils y ajoutent des nouveaux développements, comme la déduction que l'électricité se comporte comme un fluide incompressible, résultat qui n'était pas mis en évidence dans la 3<sup>ème</sup> édition. Cependant nous vérifions encore une fois le souci d'éviter une interprétation trop littérale des concepts, comme celui de "déplacement électrique", présentée comme le simple résultat d'une analogie :

"Ce n'est donc qu'à la faveur d'une comparaison de formules que Maxwell rapproche le DEPLACEMENT ELECTRIQUE produit sous l'influence d'une FORCE ELECTRIQUE, du DEPLACEMENT DES MOLECULES MATERIELLES d'un corps élastique, sous l'influence d'une FORCE MECANIQUE. Ce serait prendre à contresens l'hypothèse de Maxwell, que de voir dans le déplacement électrique un accroissement des coordonnées des molécules du diélectrique ou d'un fluide qui le pénètre, s'exécutant dans le sens des lignes de force: il se peut que le mécanisme de la déformation du diélectrique soit tout différent, et nous savons en effet que Maxwell, avec Faraday, considère le diélectrique comme tendu dans le sens des lignes de force et comprimé transversalement, ce qui ne saurait être le cas d'un fluide soumis à l'action d'une force mécanique, c'est à dire d'une pression!"<sup>52</sup>

L'influence de Poincaré se fait encore sentir ici d'une façon très nette. Dans le 3<sup>ème</sup> chapitre d' Electricité et Optique Poincaré a interprété le "déplacement électrique" comme un déplacement d'une molécule du fluide supposé remplir le diélectrique (le fluide inducteur, d'après sa nomenclature). Poincaré avertit le lecteur, cependant, que ce "mécanisme" ne peut pas être concilié avec celui qui assimile un diélectrique à un corps élastique. La contradiction entre

les deux théories est présentée par lui comme une preuve que Maxwell ne prétendait pas attribuer une valeur objective à ces hypothèses. Nous reviendrons plus tard à ces réflexions de Poincaré.

Les éditions successives des Cours semblent donc témoigner de l'influence de Poincaré sur l'interprétation en France des théories de Maxwell.

Après la présentation de la théorie du déplacement électrique, les Cours exposent la théorie de la propagation des ondulations électromagnétiques. L'approche est classique et, donc, ne nous intéresse pas particulièrement ici. La "correction" de l'équation des courants par l'introduction des courants de déplacement se fait sans aucun commentaire dans la 3<sup>ème</sup> édition. Ce n'est pas le cas dans l'édition suivante où les auteurs mettent, par contre, en évidence le caractère hautement hypothétique de cette "correction" :

"Jusqu'ici le déplacement n'est qu'une pure conception analytique, et, si l'on s'en tient aux phénomènes électrostatiques, on peut dire que la théorie de Maxwell introduit il est vrai des définitions nouvelles, mais n'implique à proprement parler aucune hypothèse. Il n'en est pas de même quand on veut étendre cette théorie aux actions électromagnétiques. Maxwell admet, et c'est là une hypothèse bien hardie, sinon purement gratuite, que les COURANTS DE DEPLACEMENT exercent les mêmes action électromagnétiques que les COURANTS DE CONDUCTION, et par suite qu'ils obéissent aux lois de l'induction!"<sup>53</sup>

Ce passage démontre l'attitude beaucoup plus critique de la 4<sup>ème</sup> édition des Cours, par rapport à l'édition précédente. Entre 1883 et 1891 la réception des théories de Maxwell en France semble passer à une phase de critique des fondements de ces théories. Nous croyons que la suite de ce travail permettra de comprendre ce qui s'est passé, par l'analyse des sources relatives à cette période.

Après avoir montré que la vitesse de propagation des ondulations électromagnétiques est égale à la vitesse de la lumière, Jamin conclue :

"Il nous est donc loisible de considérer la lumière comme consistant en perturbations électromagnétiques identiques à celles que nous venons d'étudier".<sup>54</sup>

Jamin déduit ensuite les deux autres conséquences de la théorie électromagnétique de la lumière: la relation entre la constante diélectrique et l'indice de réfraction, et celle concernant l'absorption de la lumière par les corps conducteurs.

Il signale finalement que l'explication de la polarisation rotatoire magnétique n'a pu être fournie par Maxwell, dans le cadre de sa théorie, que par l'introduction d'une hypothèse nouvelle: celle des tourbillons moléculaires.

L'appréciation finale de la théorie traduit l'absence d'une base empirique solide :

"En résumé, la théorie de Maxwell rend un compte assez satisfaisant de l'ensemble des phénomènes auxquels elle s'applique: l'expérimentation n'est pas encore assez avancée pour permettre toutes les vérifications que comporterait cette théorie, ni à plus forte raison pour la compléter, de manière à la mettre en harmonie par le détail avec l'ensemble de tous les faits connus".<sup>55</sup>

Dans la 4<sup>ème</sup> édition ce paragraphe est remplacé par un autre qui exprime encore un certain scepticisme vis à vis de la théorie électromagnétique de la lumière :

"Cette curieuse théorie n'est d'ailleurs visiblement qu'ébauchée, et l'on doit avouer que les diverses tentatives faites depuis Maxwell pour la compléter ou l'éclaircir n'ont levé que très partiellement les difficultés assez nombreuses qu'elle soulève".<sup>56</sup>

Il est, dans ce contexte, étonnant que les auteurs ne fassent aucune allusion, dans la 4<sup>ème</sup> édition, aux expériences de Hertz de 1888.

SECTION III.3- LES COURS DE POTIER A L'ECOLE POLYTECHNIQUE

Nous avons signalé dans le chapitre II que Potier a été probablement l'un des premiers savants français à exposer la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell, avec ses hypothèses de base, et cela dès 1873. Il a aussi été l'un des éditeurs du TREATISE en langue française (1885 et 1887, respectivement, pour les vols. I et II).

A partir de ces antécédents, la place que Potier accorde aux théories de Maxwell dans son enseignement à l'Ecole Polytechnique, constitue une énigme qui peut-être ne pourra pas être résolue, à partir des données dont nous disposons. Nous verrons que Potier introduit avec beaucoup de retard dans son enseignement une référence aux théories de Maxwell, et seulement après les résultats expérimentaux de Hertz (1888).

Potier, lui-même formé à l'Ecole Polytechnique (1857-59), y a été répétiteur à partir de 1867, et professeur de physique à partir de 1881. Ses cours se prolongent au moins jusqu'en 1894.

Les sujets qu'il a enseignés se classent en deux "divisions". Dans la 1<sup>ère</sup> division il s'agissait, essentiellement, de l'Acoustique et de l'Optique. Dans la 2<sup>ème</sup> division il s'agissait de l'Elasticité, de la Théorie Mécanique de la Chaleur et de l'Electricité et du Magnétisme.

Nous avons eu accès aux versions manuscrites de ses cours, concernant les deux divisions citées plus haut, pour les années suivantes :

	1887/8		1888/3
1 <sup>ère</sup> division	1891/2	2 <sup>ème</sup> division	1888/9
	1893/4		1892/3

Les références à Maxwell seront faites dans les cours de la 1<sup>ère</sup> division (seulement à partir de 1891/2), c'est à dire, dans le cadre de l'Optique. C'est un premier élément qui ressort de l'analyse de

ces cours et que nous voulons mettre en relief dès le départ. Cette évidence renforce notre thèse selon laquelle la pénétration de Maxwell en France s'est réalisée par l'intermédiaire des conséquences optiques de ses théories. Les cours de la 2<sup>ème</sup> division, qui incluent l'Electricité et le Magnétisme, ne font aucune référence aux théories de Maxwell dans ce domaine, avant 1892/3 (où Potier expose l'application des équations de Lagrange à un système de circuits électriques, de la 4<sup>ème</sup> partie du Treatise).

Dans son cours de 1887/88, qui donne une large place à l'Optique physique (c'est-à-dire aux théories éther-élastiques de la lumière) il n'y a aucune référence à la théorie électromagnétique de la lumière. En se référant à l'hypothèse des ondulations de l'éther dans l'Optique, Potier se limite à dire:

"Aucun fait n'est en contradiction avec cette hypothèse. Elle accorde, il est vrai, à un milieu hypothétique un rôle prépondérant dans la nature, empregnant tous les corps, il ne peut rester étranger à aucune de leurs modifications et ce n'est pas dans les phénomènes lumineux seulement qu'il doit intervenir; son rôle dans les échanges de chaleur est évident. L'égalité des nombres qui expriment l'un la vitesse de la lumière, l'autre le rapport des unités électrostatique et magnétique montre que son intervention dans les phénomènes électriques est au moins vraisemblable.

Il est donc permis d'espérer que cette hypothèse fournira un jour le lieu cherché entre les théories partielles de la physique, et qu'on pourra, après avoir reconnu l'équivalence des diverses manifestations de l'énergie, travail mécanique, actions chimiques, chaleur, lumière, courants, connaître par quel mécanisme elles se transforment les unes dans les autres".<sup>57</sup>

Nous devons remarquer la grande crédibilité accordée à l'existence de l'éther et au programme éther-élastique en Optique. L'hypothèse de l'éther pourrait être - dit-il - à la base d'une théorie unitaire des phénomènes physiques. Ce même éther doit, "vraisemblablement",

jouer un rôle dans les phénomènes électriques et magnétiques. Cette idée n'est pas nouvelle et ne peut pas être attribuée, uniquement, à Maxwell. En fait depuis Ampère, plusieurs physiciens, en France et dans d'autres pays, ont essayé de trouver dans l'éther l'explication des phénomènes électriques et magnétiques.

Dans les parties des cours de la 2<sup>ème</sup> division, concernant l'électrostatique, l'usage des concepts de "lignes" et "tubes de force" est courant dès l'édition de 1882/83. Le siège de l'énergie reste cependant les conducteurs, et il faut attendre la "Note"

de 1891/92 pour que soit prouvée la transformation mathématique qui permet d'exprimer l'énergie comme répandue dans tout le milieu.

L'hypothèse de la polarisation pour expliquer le rôle des diélectriques en électrostatique est présentée dès 1882/3, avec le concept de distribution fictive d'électricité, qui lui est associée (par "analogie" avec le phénomène de l'aimantation par influence).

Il y a cependant une référence rapide à l'idée de Faraday d'établir un rapport entre les tensions et pressions dans le milieu diélectrique et l'état de polarisation de celui-ci. Potier se limite à exposer le raisonnement de Faraday qui, partant de l'hypothèse d'une polarisation diélectrique, arrive à l'idée que l'action électrostatique est transmise de proche en proche.<sup>58</sup>

Il faudra attendre le cours de 1891/2 pour que Potier introduise une section ayant comme titre "Note sur la théorie dite électromagnétique", et puis "Théorie électromagnétique", dans le cours de 1893/94. Sûrement les expériences de Hertz ont légitimé cette introduction tardive de toute référence à la théorie électromagnétique de la lumière. Potier consacre, d'ailleurs, une large place à la description de ces expériences dans ces deux cours. Il faut également souligner que cette "Note" est introduite seulement à la fin, après une exposition détaillée des théories éther-élastiques de la lumière.

Le retard avec lequel Potier - un des premiers à divulguer en France la théorie électromagnétique de la lumière - introduit une référence à cette théorie dans ses Cours pourrait, au premier abord, être attribué à la lenteur, maintes fois signalée, avec laquelle l'enseignement scientifique absorbe les innovations. Cependant si cela est peut-être

vrai dans l'actualité, il n'était pas un trait obligé des cours de l'époque. Il suffit de songer par exemple aux leçons de Poincaré à la Faculté des Sciences ou à celles de Mascart au Collège de France. Etant données les différences institutionnelles, on peut toujours soulever que cette comparaison est arbitraire.

Néanmoins, la thèse du conservatisme de l'enseignement de Potier reçoit une confirmation à notre avis décisive quand on le compare à celui de Jamin, aussi à l'Ecole Polytechnique. Effectivement, dans le 4<sup>ème</sup> volume de la troisième édition des Cours de Jamin (1883), une large place est accordée aux théories de Maxwell.

Il n'y a pas lieu ici de reprendre l'exposé de Potier dans sa "NOTE", qui ne présente pas d'intérêt particulier. Son appréciation finale de la théorie électromagnétique de la lumière nous est, par contre, précieuse. Potier met en relief ce qu'il considère être une limitation de la théorie proposée par Maxwell, comparée aux théories traditionnelles en Optique :

"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 des derniers une explication mécanique en admettant que l'énergie de l'éther y existe sous des formes déjà connues".<sup>59</sup>

Nous voyons dans cet extrait un témoignage, non seulement de la crédibilité dont étaient investies les théories éther-élastiques de la lumière aussi tard que 1893, mais surtout du rôle attribué aux explications mécaniques en Physique. La théorie électromagnétique de la lumière, au moins dans sa formulation du Treatise, ne remplissait pas, pour certains, les exigences d'une explication mécanique des phénomènes lumineux.

Dans l'introduction à sa "Note" Potier précise ce qu'il entend par "explication mécanique". La comparaison entre la mesure du rapport des unités (qui d'après la théorie de Maxwell serait égale à la vitesse de propagation des ondulations électromagnétiques) et la mesure de la vitesse de la lumière conduit, selon Potier, à

"... la conclusion que c'est l'éther de la théorie des ondu-  
 lations qui est en même temps le véhicule des actions  
 électriques; on a même été plus loin et conclu que, toute  
 perturbation du milieu étant un phénomène électrique, la  
 lumière n'était qu'un cas particulier de ceux-ci, à savoir  
 la propagation de perturbations alternatives, d'une pério-  
 de excessivement courte, et l'Optique ne serait qu'une sec-  
 tion de l'Electricité, dont l'étude embrasserait les per-  
 turbations tant permanentes que périodiques de l'état du  
 milieu éthéré. Ces vues semblent se confirmer à mesure que  
 les expériences s'accumulent, mais ne forment pas encore  
 un corps de doctrines classiques. Dans les théories de  
 Fresnel et de ses successeurs, l'éther est considéré comme  
 doué d'inertie et d'élasticité; il ne diffère de la matiè-  
 re pondérable que par son incapacité à propager des vibra-  
 tions longitudinales; l'esprit n'a aucune peine à se repré-  
 senter les phénomènes et à les matérialiser; l'explication  
 est entièrement mécanique. Une semblable représentation mé-  
 canique manque pour l'électricité; ni la charge électrique,  
 ni le courant ne sont jusqu'ici susceptibles d'une sembla-  
 ble représentation".<sup>60</sup>

Cette objection à l'égard de la théorie électromagnétique de  
 la lumière, à savoir l'inexistence d'un fondement mécanique consistant  
 pour cette théorie, a sûrement marqué d'une façon décisive sa réception,  
 notamment de la part de savants, comme Potier, qui étaient compromis  
 avec le programme de théories éther-élastiques de la lumière.

Peut-être personne mieux que W. Thomson n'a pu représenter  
 d'une façon plus claire et déterminée, cette résistance vis à vis la  
 théorie électromagnétique de la lumière. Effectivement, il n'a jamais  
 accepté totalement cette théorie, puisqu'elle ne se prêtait pas facile-  
 ment à une représentation mécanique :

"Je ne suis jamais satisfait, tant que je n'ai pas pu fai-  
 re un modèle mécanique de l'objet; si je puis faire un mo-  
 dèle mécanique, je comprends; tant que je ne puis pas fai-  
 re un modèle mécanique, je ne comprends pas, et c'est pour  
 cela que je ne comprends pas la théorie électromagnétique  
 de la lumière. Je crois fermement en une théorie electro-  
 magnétique de la lumière; quand nous comprendrons l'élec-  
 tricité, le magnétisme et la lumière, nous les verrons  
 comme des parties d'un tout; mais je demande à comprendre  
 la lumière le mieux possible sans introduire des choses  
 que je comprends encore moins. Voilà pourquoi je m'adresse  
 à la Dynamique pure".<sup>61</sup>

Le rapprochement entre les considérations de Potier et celles de W. Thomson ne nous semble pas arbitraire. Ce dernier a sans doute beaucoup influencé la réception des théories de Maxwell et il n'est pas improbable que ses objections aient trouvé une audience à l'intérieur de la communauté scientifique française. Le passage qu'on vient de citer a été repris dans un article de Brillouin, qui fait partie d'un recueil de travaux de W. Thomson, traduits et commentés par le premier. Nous verrons dans le prochain chapitre que Brillouin a essayé de fournir une explication mécanique des théories de Maxwell, dans l'esprit de celle demandée par W. Thomson.

L'extrait suivant d'un article de Stoletow publié dans le périodique Lumière Electrique de 1890, peut être vu également comme une évidence de la pénétration en France, de ce type d'exigence à l'égard de la théorie électromagnétique 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 "electromagnétique" 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'electromagnétisme 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 ELECTRIQUE"; 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".<sup>62</sup>

Cette mécanisation extrême de l'électromagnétisme, demandée par Stoletow et W. Thomson, n'a pas trouvé beaucoup d'adeptes en France, d'après les données que nous possédons. Potier, par exemple, ne serait sûrement pas prêt à accepter les modèles mécaniques de l'éther qui ont été proposés par des générations de savants britanniques. Il faudrait d'ailleurs caractériser le type de philosophie mécaniste qui a pu exister en France, par opposition à celle représentée par W. Thomson ou

O. Lodge en Grande-Bretagne.

En tout cas, une réaction à cette philosophie mécaniste, dans ses formes extrêmes ou modérées, est, par contre, facilement identifiable en France. Nous aurons l'opportunité de l'analyser à travers deux représentants de ce courant : Poincaré et Duhem.

L'Enseignement Scientifique et la Reception de Théories  
de Maxwell en France dans les années 80

Nous pouvons affirmer, à partir des analyses de ce chapitre, que les leçons de Mascart au Collège de France et celles de Jamin à l'Ecole Polytechnique ont introduit les théories de Maxwell dans l'enseignement supérieur en France au début des années 80.

Cela constitue à notre avis une preuve d'un certain degré d'acceptation ou, en tout cas, de diffusion des idées de Maxwell en France à cette époque.

Nous pouvons en outre, affirmer que l'électrodynamique de Helmholtz de 1870 (qui peut conduire, d'une façon que nous préciserons plus tard, aux mêmes conséquences que l'électrodynamique de Maxwell) était beaucoup moins diffusée. L'électrodynamique de Helmholtz ne fera objet d'enseignement en France qu'à partir du début des années 90, mais dans le contexte d'une comparaison avec les théories de Maxwell. Nous relevons toutefois, la place spéciale assignée à l'électrodynamique de Helmholtz dans l'oeuvre de Mathieu et de Duhem, avec les repercussions certaines sur leur enseignement.

Les théories électriques de la lumière de Riemann, Lorenz, Neumann, etc., sont par contre citées aussi bien par Mascart que par Jamin. Sans parler des théories éther-élastiques de la lumière qui seront enseignées même pendant les années 90, ce qui prouve que la théorie électromagné

tique de la lumière de Maxwell a attendu longtemps avant de devenir la théorie de la lumière aux yeux de la communauté scientifique française du XIX<sup>ème</sup> siècle.

En dépit de l'hétérogénéité des matériaux analysés dans ce chapitre, essayons de dégager certaines unités thématiques qui se rapportent à la place assignée aux théories de Maxwell dans l'enseignement scientifique français pour la période qui correspond grosso modo aux années 80.

Un trait commun aux cours analysés concerne l'usage assez répandu des concepts de lignes et de tubes de force en électrostatique. Toutefois, ces "habitudes de langage", comme dirait Poincaré, ne supposaient pas l'adhésion à une théorie particulière de la transmission de l'action. Au contraire, les cours soulignent l'équivalence entre l'approche "classique" et celle de Maxwell. Parfois, comme c'est le cas chez Potier, l'usage de ce langage n'était même pas accompagné de l'idée que l'énergie électrostatique a son siège dans le milieu. L'approche d'action contigüe et médiatisée ne semble acquérir une certaine vraisemblance qu'à travers la théorie électromagnétique de la lumière.

Dans l'étude des milieux diélectriques, la théorie du déplacement électrique et la théorie de la polarisation de Poisson-Mossotti sont en général présentées côte à côte, sans que leur incompatibilité soit signalé. Il est, cependant, symptomatique que Jamin et Bouty suppriment toute référence à cette dernière théorie à partir de la 4<sup>ème</sup> édition de leur Cours.

En électrodynamique nous signalons que la "correction" des équations pour le courant électrique, par l'introduction des courants de déplacement, ne semble pas poser problème. Il faut ainsi attendre la 4<sup>ème</sup> édition du Cours de Jamin et Bouty pour que ces auteurs fassent des commentaires à ce sujet.

Vis à vis de la théorie électromagnétique de la lumière, les cours analysés, à l'exception peut être de celui de Mascart, sont assez réservés. Le cas extrême est celui de Potier, qui ne fait référence à cette théorie qu'à partir du début des années 90 et, probablement, en réponse aux expériences de Hertz. Il est à ce propos significatif que cette théorie soit en général exposée dans un chapitre spécial consacré à

des "théories générales", c'est-à-dire à des théories ayant un caractère hautement hypothétique, voire spéculatif. De toute façon, les théories éther-élastiques de la lumière, en dépit de leurs difficultés, semblent recevoir plus de crédibilité. Nous croyons que l'idéal d'explication mécanique des phénomènes physiques joue, ici, un rôle important. La position de Potier est typique: il est plus disposé à accepter une "explication" des phénomènes électromagnétiques à partir de l'hypothèse d'un éther luminifère, que l'explication des phénomènes lumineux à partir de concepts non immédiatement mécaniques, comme celui de "courant électrique".

Dans ce contexte nous signalons l'influence de Poincaré sur le Cours de Jamin et Bouty, dans le sens d'une critique à un idéal d'explication mécanique, qui prône la mise en évidence d'un mécanisme sous-jacent aux phénomènes. Nous reviendrons à ce sujet dans le chapitre consacré à Poincaré.

L'impression générale qui se dégage de l'analyse de tous ces Cours est, toutefois, celle d'une assimilation plutôt passive des idées de Maxwell. Nous ne croyons pas qu'on puisse fonder cela simplement en invoquant la nature de ces sources - et là nous renvoyons aux considérations de Kuhn sur les "manuels d'enseignement". Nous sommes plutôt enclins à caractériser, à partir de ces sources, une phase de la réception des théories de Maxwell en France. Il faudra effectivement attendre la fin des années 80 pour que ces théories soient soumises à une critique systématique, et assimilées à l'intérieur de programmes de recherche.

## C H A P I T R E I V

### L'INSERTION DES THEORIES DE MAXWELL DANS LA RECHERCHE EN FRANCE

-----

SECTION IV.1 - LE TRAITE DE PHISIQUE MATHEMATIQUE DE E. MATHIEU	p.93
- Une Interprétation Mécanique de l'Electrostatique du <u>Treatise</u>	p.98
- La Théorie des Diélectriques de Poisson-Mossotti	p.104
- La Théorie de l'Electrodynamique de E. Mathieu	p.109
SECTION IV.2 - BRILLOUIN ET SON ESSAI D'INTERPRETATION MECANIQUE DES THEORIES DE MAXWELL	p.112
- Le Choix des Lois Expérimentales et l'Hypothèse sur le Siège de l'Energie	p.119
- Les propriétés Elastiques du Milieu	p.122
- La Permanence de l'Idéal Mécaniste chez Brillouin	p.126

L'année 1885 est marquée par un événement majeur de l'histoire de la réception des théories de Maxwell: la publication du premier volume de la traduction française du Treatise.

A cette époque les théories du savant écossais étaient déjà largement diffusées en France, en particulier à travers les cours de physique que nous avons analysés dans le chapitre précédent.

L'année 85 nous semble, toutefois, annoncer une phase nouvelle de la réception de ces théories, où celles-ci seront graduellement assimilées par la recherche en France. Les théories de Maxwell seront analysées, comparées aux théories jusqu'alors admises et intégrées dans des programmes de recherche.

Les sources que nous avons réunies dans ce chapitre constituent, à notre avis, des évidences d'une "adoption active" — pour utiliser un concept de Dolby<sup>1</sup> — des théories de Maxwell par la communauté scientifique française. Les écrits de Mathieu et de Brillouin se différencient, en effet, des sources analysées dans les chapitres précédents, par leur perspective critique. Il ne s'agit plus seulement de présenter les théories de Maxwell mais, surtout, de les analyser en faisant appel à un cadre conceptuel admis et les intégrer dans des projets de recherche.

Les discussions de Mathieu et de Brillouin des théories de Maxwell présentent un trait commun: la recherche d'un fondement mécanique des théories du savant écossais, en particulier de la notion de "déplacement électrique" de son électrostatique.

Cet aspect de l'approche de ces deux savants va acquérir toute son importance quand nous viendrons à considérer les critiques, formulées par Poincaré et par Duhem, de l'idéal d'explication mécanique des phénomènes physiques.

Les écrits de Mathieu et de Brillouin sont toutefois, assez distincts par leurs références théoriques. Tandis que Mathieu essaie de comparer les théories de Maxwell aux théories traditionnelles, notamment en électrostatique, Brillouin semble déjà engagé dans un programme qui considère comme acquis les résultats de l'entreprise Maxwellienne.

SECTION IV.1- LE TRAITE DE PHISIQUE MATHEMATIQUE DE E. MATHIEU

Emile Mathieu est cité par Duhem dans ses Leçons sur l'Électricité et le Magnétisme comme un des physiciens français ayant critiqué la théorie de Maxwell.<sup>2</sup> Effectivement, l'analyse que nous allons entreprendre de l'oeuvre de Mathieu nous conduira à faire coïncider la publication de sa Théorie du Potentiel (1885/6) avec le début d'une phase de critique et d'approfondissement, en France, des théories de Maxwell en électricité et en magnétisme .

L'influence que Mathieu<sup>3</sup> a pu exercer à l'intérieur de la communauté scientifique française n'a vraisemblablement pas été très grande, si on la mesure à la reconnaissance de son travail scientifique. Le témoignage de Duhem ne laisse aucun doute à cet égard. Nous nous permettons de citer un assez long extrait du début de son article de 1892 où il trace un portrait de Mathieu savant. L'intérêt de cet extrait ne se réduit pas au tableau assez éloquent que dépeint Duhem de la structure du pouvoir à l'intérieur de la communauté scientifique française de l'époque. Il nous semble d'autant plus précieux, pour justifier que nous le citons in extenso que Duhem ne soupçonnait peut-être pas encore que, lui aussi, deviendrait une victime du système qu'il dénonce:

"If it were asked what tyranny in this world has least foundation in reason and is at the same time most overbearing and capricious, none could be found to answer better to this description than fashion; that fashion which makes us admire to-day what but yesterday would have excited astonishment , and which may provoke ridicule to-morrow. We all know that this sovereign whose iron rule is so much more keenly felt on account of its injustice governs the thousand and one details of every-day life; that it is supreme in literature and in the arts. But those who have not watched closely the life of the scientific world may perhaps be surprised to hear that even there if you would please you must bend the knee to fashion. What? might exclaim the stranger to the world of science, can it be true that the mathematician knows other laws than the inflexible rules of logic? Does he care to obey other orders than the invariable commands of reason? — Well, yes. Of course, to have a mathematical production accepted as correct, it is sufficient that it conforms to the precepts of logic; but to have it admired as beautiful, as interesting, as of importance, to gain honor and success by it, more is required: it must then satisfy

the manifold and varying exactions imposed by the prevailing taste of the day, by the preferences of prominent men, by the preoccupations of the public.

Thus it comes to pass that, in mathematics as elsewhere, fashion will sometimes award the laurels to those who have not deserved the triumph and make victims of men whose lack of success is an injustice. In every country there are such victors and such victims; but nowhere perhaps are they more numerous than in France. In this country where centralization is carried to an extreme, nothing is accepted unless it receive the sanction of Paris, or rather of certain constituted bodies, of certain official persons residing in Paris. Those who have been so fortunate as to have their work noticed by these persons and approved by these bodies, who have been granted admission to the chairs of the capital, form in the opinion of the French public the only men of science worthy of honor. The others, relegated to the provinces, are left to oblivion, almost like those seigneurs in the age of Louis XIV whom a caprice of the monarch relegated to their country estates. Such are the reflections suggested to my mind by the contemplation of the life and works of Emile Mathieu. An indefatigable and productive worker he leaves behind him the results of a lifework, partly as newly acquired possessions of science, partly as suggestions that will open new paths to the seeker after truth. After a life full of disappointments, he died at a time when the official men of science hardly had begun to suspect that somewhere in the provinces, far away from the capital, there lived a mathematician whose works were an honor to his country. These works had one defect: the subjects they treated, the methods they employed, were not in fashion!"<sup>4</sup>

Nous devons légitimement nous demander — et cette question est pertinente dans le cadre de ce travail, dont un des objectifs est celui de décélérer les normes et critères de jugement d'une communauté de savants — quelle était cette "mode" à laquelle Duhem fait référence. Son article fournit quelques éléments de réponse à cette question. Il signale, particulièrement, le déclin de la prestigieuse tradition de Physique Mathématique française de la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle :

"The death of Lamé resulted in finally bringing mathematical physics into discredit in France. D'Alembert, Clairaut, Lagrange, Laplace, Legendre, Fourier, Poisson, Cauchy, Navier, Fresnel, Ampère, Sadi Carnot, Clapeyron, Lamé, accumulated in the course of a century the discoveries that had grown out of the fruitful union of mathematical speculation and the observation of nature (...) Suddenly, the path

they had laid open was forgotten (...) and while the higher minds took refuge in the realm of mathematical combinations devoid of all reality, the great mass of students turned to the ascertainment of facts, to experimentation without theory, without idea".<sup>5</sup>

Cette "mode", si nous interprétons bien Duhem, serait caractérisée par la valorisation des recherches en mathématiques pures d'un côté, et par une coupure entre les recherches expérimentales et les recherches théoriques en physique de l'autre côté. Ces dernières étaient, de toute évidence, inexistantes ou marginalisées, d'après l'appréciation de Duhem.

Duhem continue, plus loin, en se référant à l'influence de Poisson :

"Mathieu had studied him thoroughly; he might be said to be his successor. Such tendencies were not calculated to secure Mathieu in the good graces of his contemporaries. His researches might require great intellectual qualities; they might be fraught with beautiful results; what of it? He was the champion of a science that was out of fashion".<sup>5</sup>

Ainsi le Traité de Physique Mathématique de Mathieu serait inspiré de l'idéal poursuivi par Poisson avec ces traités, à savoir celui de pourvoir à "une vision globale et unifiée de tout ce qui est connu rigoureusement dans l'application de la mathématique à l'étude de la nature".<sup>6</sup>

Ce portrait de Mathieu que trace Duhem, ne nous semble pas toujours très cohérent. Comment en fait concilier cette influence de Poisson avec la préoccupation de Mathieu avec la "généralité des méthodes" employées dans ses recherches, ou son souci d'éviter des hypothèses? Duhem signale, par exemple, l'intérêt que portait Mathieu aux méthodes de la Mécanique Analytique, notamment dans sa formulation plus axiomatique due à Jacobi. Dans le même ordre d'idées Duhem caractérise l'usage d'hypothèses par Mathieu :

"... care for generality is also Mathieu's guide in the solution of problems requiring the use of hypotheses that are uncertain or only approximately true. Following a method which in our opinion could not be too much

recommended, he always begins by establishing the equations of the problem and treating them as long as possible without making use of those hypotheses so as to introduce them only at the end".<sup>7</sup>

Or, Duhem lui-même dans l'ouvrage Evolution de la Mécanique décrit la différence entre les approches de la "Mécanique Physique" de Poisson et celles de la "Mécanique Analytique" de Lagrange. La première pronait justement l'usage d'hypothèses sur la "nature intime des choses"<sup>8</sup> et critiquait cette dernière par son caractère trop abstrait.

En ce qui concerne l'électricité et le magnétisme nous verrons que Mathieu a, effectivement, puisé beaucoup d'idées chez Poisson (comme d'ailleurs, Duhem lui-même). Il développe la théorie du magnétisme à la manière de Poisson, et se refuse d'accepter l'hypothèse d'Ampère sur la cause du magnétisme dans les courants moléculaires (cette dernière recevait la faveur de Maxwell<sup>9</sup>).

Mathieu s'est aussi penché sur l'électrodynamique de Weber, qui suppose des hypothèses sur la nature des courants électriques et sur une certaine loi d'interaction à distance entre les constituants de ces courants. Là aussi il reste donc attaché, en ce qui concerne les critères du choix des hypothèses, à la tradition de Physique Mathématique représentée par Laplace et Poisson.

Ce serait cependant une erreur de vouloir classer Mathieu par rapport à des controverses méthodologiques vieilles de 50 ans! Mathieu avait, par exemple, prévu une longue exposition des théories éther-élastiques de la lumière pour le huitième volume de son Traité; et on connaît l'opposition des Laplaciens au premier essai de ce type de théories par Fresnel.

Dans ce contexte il faudrait souligner la tentative de Mathieu de donner un fondement mécanique à l'électrostatique du Traité, ce qui montre son attachement aux explications dérivées de la théorie de l'élasticité, et appliquées notamment à l'étude de l'éther luminiphère. Il ne fait, cependant, aucune référence aux modèles de l'éther électromagnéti -

que du type de celui proposé par Maxwell dans le mémoire PH.

Rattacher Mathieu aux choix méthodologiques de la tradition de Physique Mathématique française est donc une tâche très complexe.

Duhem d'ailleurs se garde de vouloir établir une filiation trop directe, quand il affirme que Mathieu "while full of respect for the tradition of these men of genius (...) does not allow this reverence to become a superstition; he knows where to depart from their views".<sup>10</sup>

L'intérêt de l'article de Duhem ne se limite pas, uniquement, à la caractérisation de Mathieu en tant que savant. Nous soupçonnons, en fait, que l'identification de ces deux savants ne se borne pas à leur sort commun aux prises avec la hiérarchie scientifique française. Duhem voyait sûrement l'oeuvre de Mathieu comme un exemple et une source d'inspiration pour son propre travail.

Un autre élément qui se dégage de cet article concerne la thèse du "déclin" de la physique théorique française. Plus récemment cette thèse, touchant approximativement la période qui va de 1840 à 1870, a été soulevée par de nombreuses études consacrées à la physique française au XIX<sup>ème</sup> siècle. Nous nous limitons à donner les références. L'analyse de la question dépasserait le cadre de ce travail. 11

L'ouvrage Théorie du Potentiel et des Applications à l'Electrostatique et au Magnetisme de E. Mathieu, publié en 1885, présente un intérêt particulier pour la discussion et critique qu'elle ouvre sur les fondements de l'électrostatique du Treatise.

Si les Leçons sur l'Electricité et le Magnetisme de Mascart et Joubert ont été le point de départ de la divulgation systématique des théories de Maxwell en France, l'ouvrage de Mathieu inaugure une phase d'assimilation et de critique des théories du savant écossais. Nous y trouvons, en ce qui concerne l'électrostatique, certains des éléments qui, plus tard, vont caractériser les critiques de Poincaré et de Duhem faites aux théories de Maxwell.

Nous allons, par la suite, analyser cet ouvrage, dans ce qu'il contient de significatif pour notre sujet, en essayant de mettre en évidence les traits singuliers qui le caractérisent par rapport aux sources que nous avons discutées dans les chapitres précédents.

#### Une Interprétation Mécanique de l'Electrostatique du Treatise

Le lieu thématique choisi pour introduire les concepts de Faraday et de Maxwell est, dans l'ouvrage Théorie du Potentiel<sup>12</sup>, le chapitre sur "le rôle des diélectriques dans l'électrostatique" :

"Il est à peu près évident que les corps ne peuvent agir les uns sur les autres à distance que par l'intermédiaire du milieu qui les sépare. Ainsi, c'est à cause de ce milieu que les astres s'attirent. De même, deux corps chargés d'électricité et isolés l'un de l'autre ne peuvent s'influencer que par le milieu diélectrique qui se trouve entre eux. Cette idée ne peut être regardée comme nouvelle, ainsi que le prétend Maxwell, mais la véritable difficulté consiste à préciser le rôle rempli par le diélectrique et à montrer les forces qui sont en jeu. C'est aussi ce qu'a essayé de faire ce physicien".<sup>13</sup>

Il faut remarquer que Mathieu est le premier des auteurs, étudiés jusqu'ici, à prendre de façon non équivoque et, disons, A PRIORI, le parti de l'hypothèse que les corps interagissent au moyen d'un milieu et que l'action se transmet de proche en proche et non pas à distance.

La tentative de Maxwell d'exprimer l'action électrostatique comme l'effet d'un état de contrainte dans lequel se met le milieu par la présence des corps électrisés, est donc justifiée par cette option de départ.

Il s'agira pour Mathieu de voir si la théorie de Maxwell est, non seulement, conforme à l'expérience, mais, surtout, si elle possède une cohérence interne.

Mathieu commence par exposer le contenu du chapitre V de la 1<sup>ère</sup> partie du Treatise où Maxwell développe sa théorie des pressions et tensions dans le milieu, pour expliquer l'action mécanique entre des corps électrisés.<sup>14</sup> Mathieu met en évidence que dans cette théorie, les forces élastiques du milieu "satisfont aux mêmes équations que celles qui se développent dans un corps solide en équilibre d'élasticité", c'est-à-dire, aux équations :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_{xx}}{dx} + \frac{dP_{yx}}{dy} + \frac{dP_{zx}}{dz} &= 0 \\ \frac{dP_{xy}}{dx} + \frac{dP_{yy}}{dy} + \frac{dP_{zy}}{dz} &= 0 \\ \frac{dP_{xz}}{dx} + \frac{dP_{yz}}{dy} + \frac{dP_{zz}}{dz} &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

entre les neuf composantes  $P_{ij}$  des efforts (stress) sur les surfaces d'un élément de volume du diélectrique.<sup>15</sup>

Il se demande alors si les relations entre le déplacement (déformation) du milieu et les forces auxquelles il fait appel sont identiques à celles valables pour un solide isotrope :

"Nous avons vu que les forces élastiques, déterminées dans un milieu diélectrique par la présence de corps électrisés, satisfont aux mêmes équations que les forces élastiques, qui se développent dans un corps solide élastique sous l'influence des forces qui s'exercent à sa surface. Il y a donc lieu de se demander si les déplacements qui se produisent dans le milieu diélectrique peuvent être identiques à ceux qui proviennent de la déformation du corps solide. Nous allons prouver le contraire".<sup>16</sup>

Si  $(u, v, w)$  sont les composantes du déplacement d'une molécule d'un solide isotrope, et si ce déplacement est infinitésimal la théorie de l'élasticité des corps solides isotropes prévoit que le déplacement sera lié aux efforts par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 (\lambda + 2\mu) \frac{du}{dx} + \lambda \frac{dv}{dy} + \lambda \frac{dw}{dz} &= p_{xx} \\
 \lambda \frac{du}{dx} + (\lambda + 2\mu) \frac{dv}{dy} + \lambda \frac{dw}{dz} &= p_{yy} \\
 \lambda \frac{du}{dx} + \lambda \frac{dv}{dy} + (\lambda + 2\mu) \frac{dw}{dz} &= p_{zz} \\
 \mu \left( \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy} \right) &= p_{yz} = p_{zy} \\
 \mu \left( \frac{dw}{dx} + \frac{du}{dz} \right) &= p_{zx} = p_{xz} \\
 \mu \left( \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) &= p_{xy} = p_{yx}
 \end{aligned} \tag{2}$$

où  $\lambda$  et  $\mu$  sont des constantes qui se rapportent aux propriétés élastiques du milieu.<sup>17</sup>

On peut déduire de ces équations et des expressions données par Maxwell pour les efforts dans le milieu électromagnétique que :

$$(3\lambda + 2\mu) \left( \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) = -\frac{1}{8\pi} \left[ \left( \frac{dV}{dx} \right)^2 + \left( \frac{dV}{dy} \right)^2 + \left( \frac{dV}{dz} \right)^2 \right] \tag{3}$$

Effectivement, selon la théorie de Maxwell, les efforts sont liées au potentiel électrostatique  $V$  par les expressions :

$$8\pi p_{xx} = \left( \frac{dV}{dx} \right)^2 - \left( \frac{dV}{dy} \right)^2 - \left( \frac{dV}{dz} \right)^2$$

$$8\pi p_{yy} = \left( \frac{dV}{dy} \right)^2 - \left( \frac{dV}{dz} \right)^2 - \left( \frac{dV}{dx} \right)^2$$

$$8\pi p_{zz} = \left( \frac{dV}{dz} \right)^2 - \left( \frac{dV}{dx} \right)^2 - \left( \frac{dV}{dy} \right)^2$$

La quantité  $\left( \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right)$  de l'équation (3) donne ainsi la contraction cubique  $\gamma$  du milieu, selon la théorie

de Maxwell, si l'on suppose que le milieu diélectrique obéit aux équations (2) pour les petits mouvements d'un solide isotrope.

Mais les équations (1) et (2) conduisent, par contre, au résultat :<sup>18</sup>

$$\left( \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) = 0 \quad , \quad (4)$$

incompatible avec l'équation (3) .

Mathieu conclue de cette incompatibilité que les déplacements des molécules du diélectrique ne sont pas assimilables aux petits déplacements qui ont lieu dans un corps solide, exprimés par les conditions (2) :

"Il faut donc en conclure que les molécules de la substance dans laquelle se développent les forces élastiques, subissent un changement fini dans leur disposition, en s'orientant suivant les lignes de force. Il en résulte que le milieu diélectrique présente, au point de vue des dilatations et des contractions, moins d'analogie avec un corps solide qu'avec un corps liquide, où l'orientation des molécules n'entre pas en considération".<sup>19</sup>

Nous voulons mettre en évidence que les résultats obtenus par Mathieu jusqu'ici dépendent d'une interprétation mécanique de la théorie de Maxwell. Ce savant n'a pas défini, dans le Treatise, la structure que doit avoir le milieu électromagnétique, de façon à ce qu'il puisse supporter l'état de contrainte nécessaire pour transmettre les actions électrostatiques observées? Maxwell s'est dit "incapable" de fournir une telle interprétation, tout en signalant son intérêt.

Mathieu, par contre, suppose, dans le raisonnement que nous venons de rapporter, que le diélectrique se comporte comme un solide élastique isotrope ayant une structure moléculaire. Il interprète, donc, littéralement, l'analogie que donne Maxwell dans le §60 du Treatise.

En remplaçant cette interprétation par une autre, compatible avec la condition (3), Mathieu reste dans cette perspective de donner une interprétation mécanique de la théorie du déplacement électrique, comme

nous verrons par la suite.

Mathieu suppose maintenant que le diélectrique se comporte comme un fluide incompressible qui se meut le long des tubes de force. Il cherchera à obtenir l'expression du rapport entre le déplacement de ce milieu et la force électrique. Le déplacement à travers le tube se fait du conducteur qui porte la charge positive vers le conducteur qui porte la charge négative.

Soient  $\epsilon$  et  $\epsilon'$  les déplacements ayant lieu à travers les sections  $d\sigma$  et  $d\sigma'$  du tube de force.

Si le fluide est incompressible,

$$\epsilon d\sigma = \epsilon' d\sigma'$$

Si  $R$  et  $R'$  sont les forces électriques sur chaque section respectivement, on aura aussi  $R d\sigma = R' d\sigma'$ , étant données les propriétés des tubes de force.

On peut alors déduire que :

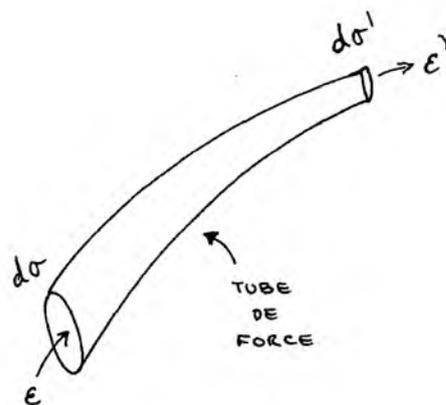
$$\frac{\epsilon}{R} = \frac{\epsilon'}{R'} = \text{constante,}$$

c'est-à-dire, la proportionnalité entre le déplacement et la force électrique.

Cette proportionnalité est donc une conséquence de l'incompressibilité du fluide et de l'hypothèse qu'il est repoussé par une couche électrique d'une quantité proportionnelle à la densité de cette couche.

Mathieu suit donc un cheminement différent de celui de Maxwell dans le Treatise. La proportionnalité entre la force électromotrice et le déplacement électrique est un axiome pour Maxwell formulé dans le §60 du Treatise. Cette proportionnalité est logiquement indépendante de la théorie des tensions et des pressions dans un milieu diélectrique, qu'il expose dans le chapitre V. L'incompressibilité de l'électricité est aussi une conséquence de cet axiome, et non pas le contraire, comme chez Mathieu.

Mathieu met en rapport ensuite la théorie du déplacement électrique avec la théorie de la charge chez Faraday et Maxwell :



"Suivant Faraday et Maxwell, tout tube de force, qui va d'un élément conducteur à un autre à travers un diélectrique, se divise par sections droites, excessivement voisines, en cylindres rectangles, qui ont pour bases ces sections droites et qui portent de l'électricité négative sur la base située du côté de l'élément conducteur, chargé positivement, et de l'électricité positive en égale quantité sur l'autre base. Mais les quantités d'électricité, situées sur une base d'un de ces cylindres, sont égales et de signe contraire à celles de la base la plus voisine d'un autre cylindre contiguë, en sorte que la densité de cette électricité, dite DE POLARISATION, peut être considérée comme nulle à l'intérieur du diélectrique, excepté sur les cylindres extrêmes aux deux extrémités du tube (...).

Cette polarisation du diélectrique diminue les effets de l'électricité des conducteurs, puisqu'elle amène, tout près de leurs surfaces, de l'électricité de signe contraire à celle que celles-ci possèdent (...).

Suivant Faraday et Maxwell, toute section  $d\sigma$  d'un tube de force, par l'électrisation des conducteurs, serait traversée par une quantité d'électricité qui serait égale à la quantité d'électricité  $\rho d\sigma_1$ , qui se trouve au commencement du tube sur la section  $d\sigma_1$  du conducteur.

Mais il paraît impossible de concilier cette idée avec celle de la polarisation; car l'électricité qui se trouve en égale quantité avec un signe contraire sur les bases des prismes de polarisation, est en quantité plus faible que l'électricité qui se trouve sur les sections des conducteurs faites par le tube de force".

Nous retrouvons dans cette critique un thème commun à plusieurs ouvrages français qui traitent de la théorie des diélectriques, à savoir, que la conception d'une polarisation diélectrique doit recevoir la caution de la théorie de Poisson-Mossotti. Les idées présentes chez Maxwell d'une polarisation diélectrique — affirme Mathieu plus loin —

"... ne se présentent pas "naturellement" à la suite des considérations qui précèdent. Mais il en sera autrement plus tard, quand nous verrons que cette polarisation est un phénomène identique à celui de la distribution du magnétisme induit dans le fer doux".<sup>20</sup>

Mathieu semble donc ne pas admettre la théorie du Treatise selon laquelle toute charge est le résultat de la polarisation du diélectrique. Ainsi la polarisation, dit-il, "diminue les effets de l'électri-

ité des conducteurs". Il fait, donc, implicitement, une distinction entre charge vraie sur le conducteur et charge fictive sur le diélectrique. Elles auraient des signes opposés et ne seraient pas, non plus, égales en valeur absolue.

Nous croyons voir dans l'analyse que fait Mathieu de l'électrostatique du Treatise deux éléments nouveaux par rapport à celles que nous avons rapportées dans les chapitres précédents. D'abord Mathieu essaie de donner une interprétation mécanique consistante des théories électrostatiques du Treatise comme le montrent les considérations reprises jusqu'ici. Ensuite il entreprend la comparaison entre la théorie du déplacement électrique de Maxwell et la théorie fondée sur l'hypothèse de Poisson-Mossotti. Mathieu montrera qu'elles ne conduisent pas aux mêmes résultats en ce qui concerne le rapport entre la couche d'électricité sur la surface des conducteurs, et celle sur la surface du diélectrique contigüe.

Mathieu fait cette comparaison — ce qui nous semble étonnant — sans soulever les conceptions distinctes de la transmission de l'action, sous-jacentes aux deux théories. Après avoir affirmé au début du chapitre III, son adhésion de principe à la conception d'une action médiatisée et contigüe, il l'abandonne par la suite dans l'exposition de théories fondées sur l'action à distance.

#### La Théorie des Diélectriques de Poisson-Mossotti

Pour montrer l'incompatibilité entre la théorie du déplacement électrique de Maxwell (et la théorie de la charge qui lui est associée) avec la théorie de Poisson-Mossotti, Mathieu développera d'abord la théorie du magnétisme induit. Ensuite il la transposera, comme Mossotti, au cas des diélectriques.

Avant d'exposer la théorie du magnétisme Mathieu montre que les équations caractéristiques des diélectriques peuvent être obtenues par analogie avec les équations de la propagation de la chaleur. Il souligne que cela ne constitue pas une preuve de ces équations. Elles seront dé -

montrées, par la suite, dit-il, à partir de la théorie de la polarisation diélectrique. Mathieu se refuse, également, à accepter le raisonnement de Maxwell dans le § 83 du Treatise comme offrant une preuve de ces équations.<sup>21</sup>

Mathieu revient, donc, à l'étude des diélectriques, après avoir exposé longuement la théorie du magnétisme, dûe à Poisson. Il y développe, particulièrement, la théorie de Poisson de l'aimantation par influence.

Auparavant, dans le chapitre III, Mathieu avait traité le problème du condensateur sans faire appel à l'hypothèse d'une polarisation diélectrique. Il va maintenant reprendre ce problème "suivant une toute autre voie qui nous permettra de pénétrer plus profondément dans le sujet".<sup>22</sup> Il sera question, justement, de l'hypothèse d'une polarisation, qui avait servi pour développer la théorie du magnétisme induit, et qui étayera maintenant la théorie du diélectrique. La nouvelle approche du problème du condensateur qui en résulte, va lui permettre de justifier la thèse de l'incompatibilité entre la théorie de la charge chez Maxwell et celle associée à la théorie de la polarisation diélectrique.

Nous allons par la suite exposer les principaux résultats auxquels il arrive en rapport avec la théorie du condensateur.<sup>23</sup>

Soient: A et B deux conducteurs, séparés par un diélectrique de coefficient d'induction  $q$ ;  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  les surfaces de séparation respectives;  $V_1$  et  $V_2$  les potentiels de A et B;  $V$  le potentiel dans le diélectrique;  $E_1$  et  $E_2$  les charges respectivement sur  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ ;  $\epsilon$  l'épaisseur du diélectrique. On peut déduire, sans faire appel à une quelconque hypothèse sur des processus ayant lieu dans le diélectrique, que :

$$E_1 = -E_2 = - \frac{q(V_2 - V_1)}{4\pi\epsilon} \sigma \quad (5)$$

où  $\sigma$  est la mesure des surfaces  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ .<sup>24</sup>

La théorie de la polarisation diélectrique, permet, comme dit Mathieu, de "pénétrer plus profondément dans le sujet". Elle permet d'établir la différence entre l'électricité sur les conducteurs, et l'électricité sur la surface du diélectrique, équivalente à la polarisation de ce dernier. Soient U et V les potentiels correspondants à ces deux

distributions d'électricité. Nous soulignons que maintenant la grandeur  $V$  acquiert une connotation différente de celle qui lui était attribuée dans l'équation (5) ci-dessus.

Le potentiel  $\Psi$  associé à ces deux distributions de charge sera :

$$\Psi = U + V \quad (6)$$

Donc  $\Psi$  designera la même grandeur que  $V$  dans les développements du chapitre III, et peut être substitué à la place de cette dernière dans l'équation (5).

Mathieu met en évidence que dans la nouvelle théorie, "la fonction  $V$ , potentiel de polarisation, n'a qu'un intérêt théorique, car elle ne peut être déterminée directement par l'expérience. La détermination de cette fonction est la seule chose que la théorie actuelle ajoute pour ce problème à ce que nous savons par le chapitre III."<sup>25</sup>

La théorie de la polarisation diélectrique, calquée sur la théorie du magnétisme induit, permet d'obtenir une expression pour  $V$ , le potentiel de polarisation, en supposant l'existence d'un moment de polarisation  $(A, B, C)$  dans chaque élément de volume du diélectrique. On peut obtenir à partir de cette hypothèse que :

$$V = \int \left( A \frac{d^1/r}{d\omega} + B \frac{d^1/r}{dy'} + C \frac{d^1/r}{dz'} \right) d\bar{\omega} \quad , \quad (7)$$

où l'intégrale s'étend sur tout le volume du diélectrique.

Nous ne rentrerons pas, ici, dans les détails de cette théorie, que nous allons retrouver lors de la discussion de la théorie des cellules de Poincaré. Il nous suffit, pour l'instant, de signaler ses principaux résultats.

On peut démontrer, notamment, que l'effet d'un diélectrique en état de polarisation, dans un point extérieur, est équivalent à celui d'une nappe d'électricité "fictive" distribuée sur sa surface et d'une distribution volumétrique d'électricité à son intérieur.

Si  $\chi$  est le coefficient de polarisation<sup>26</sup>, on peut aussi montrer que :

$$q = 1 + 4\pi\gamma \quad (8)$$

où  $q$  est le coefficient d'induction du diélectrique.

Les équations caractéristiques pour les diélectriques découlent naturellement de cette théorie.

Dans un condensateur il faudra distinguer la couche d'électricité sur les armatures (conducteurs) et celle sur la surface du diélectrique. Les charges  $E_1$  et  $E_2$  du chapitre III sont la somme de ces deux types de charge. Seulement cette somme est, donc, mesurable. Nous convenons de l'appeler ici,  $E_{\text{exp}}$ . Pour les différences de potentiel  $\Delta U$  et  $\Delta V$  nous pouvons établir, respectivement, les équations :

$$V_1 - V_2 = -4\pi\gamma \frac{4\pi\epsilon E_{\text{exp}}}{q\sigma} \quad (9)$$

$$U_1 - U_2 = (1 + 4\pi\gamma) \frac{4\pi\epsilon E_{\text{exp}}}{q\sigma} \quad (10)$$

Le potentiel total  $\psi$  obéira naturellement, l'équation (5), que nous reprenons ici avec les nouvelles notations :

$$\psi_1 - \psi_2 = \frac{4\pi\epsilon E_{\text{exp}}}{q\sigma} \quad (5)$$

La charge "vraie",  $E_r$ , sur l'armature du condensateur sera, d'après l'équation (10) :

$$E_r = (1 + 4\pi\gamma) E_{\text{exp}} \quad (11)$$

La charge "fictive",  $E_f$ , équivalente à la polarisation du diélectrique, et supposée distribuée sur sa surface sera, d'après l'équation (9) :

$$E_f = -4\pi\gamma E_{\text{exp}} \quad (12)$$

Des équations (11) et (12) il vient :

$$E_r = - \left( \frac{1 + 4\pi\gamma}{4\pi\gamma} \right) E_f \quad (13)$$

Donc la charge distribuée sur l'armature du condensateur a un signe opposé à celle distribuée sur la surface du diélectrique, et en valeur absolue est plus grande que celle-ci d'un facteur :

$$\frac{1 + 4\pi\delta}{4\pi\delta}$$

Ce résultat de la théorie des diélectriques est donc incompatible avec celui de la théorie du déplacement électrique qui prévoit, selon Mathieu :

$$|\epsilon_r| = |\epsilon_f| \quad .$$

Nous pouvons donc résumer la critique de Mathieu à l'électrostatique du Treatise dans trois thèses principales.

D'abord Mathieu démontre l'impossibilité de traduire littéralement l'analogie de Maxwell entre le déplacement électrique et le déplacement d'un corps solide. D'une façon plus précise, Mathieu prouve que la théorie de Maxwell de l'état de contrainte d'un milieu diélectrique, prise en conjonction avec la théorie des petits mouvements d'un corps solide isotrope, est incompatible avec la théorie du déplacement électrique du Treatise.

Il met en évidence, ensuite, que l'hypothèse d'un diélectrique qui se comporte comme un fluide incompressible, peut conduire au résultat fondamental de la théorie du déplacement électrique, à savoir, la proportionnalité entre ce déplacement et la force électromotrice.

Mathieu montre, finalement, que l'hypothèse d'une polarisation diélectrique — que Maxwell, lui-même, semblerait adopter — n'est pas compatible avec la théorie de la charge du Treatise. Cette conclusion suppose, toutefois, que l'idée de polarisation prend place naturellement à l'intérieur de la théorie de Poisson-Mossotti des diélectriques.

La Théorie de l'Electrodynamique de E. Mathieu

Le 5<sup>ème</sup> tome de l'imposant Traité de Physique Mathématique d'Emile Mathieu est consacré à la présentation des théories électrodynamiques.<sup>27</sup> Ce travail couvre les principales théories proposées dans ce domaine depuis Ampère: les recherches d'Ohm et de Kirchhoff; la théorie de F. Neumann du potentiel électrodynamique; les théories de Weber, Helmholtz, W. Thomson et Maxwell de l'induction électromagnétique; la théorie de Helmholtz pour le mouvement variable de l'électricité dans les conducteurs en repos.

Par l'étendue de l'ouvrage, qui couvre pratiquement tout le champ théorique de l'époque, et par la profondeur des analyses, nous croyons que la Théorie de l'Electrodynamique de Mathieu est venu combler un vide dans ce domaine en France. Particulièrement en ce qui concerne l'exposition de la théorie dynamique d'un système de circuits électriques du Treatise et de l'électrodynamique de Helmholtz de 1870 (dans sa partie consacrée aux corps conducteurs) nous croyons, à partir des sources dont nous disposons, que l'ouvrage de Mathieu est probablement le premier en France à se mettre au pas des dernières recherches de l'époque en électrodynamique.

L'application des équations de Lagrange à l'étude de l'interaction d'un système de circuits électriques — conçue pour la première fois par Maxwell et exposée dans son Treatise — est présentée côte à côte avec les théories de l'induction électromagnétique de Weber et de F. Neumann, comme un exercice de mathématique appliquée.

Effectivement, Mathieu n'attribue aucune signification physique (ou épistémologique) à cette théorie du Treatise. La façon dont il l'introduit est significative, à cet égard;

"Concevons un système quelconque de circuits électriques qui soient mobiles. Les courants agiront les uns sur les autres en déplaçant les conducteurs qui les portent et aussi en faisant varier leurs propres intensités. Enfin ces circuits pourront aussi être sollicités par des forces mécani -

ques autres que celles qui proviennent des courants.

On peut, comme l'a fait Maxwell, appliquer à ces mouvements les équations différentielles de Lagrange relatives à un système soumis à des liaisons."<sup>28</sup>

En particulier Mathieu ne mentionne pas l'hypothèse de Maxwell selon laquelle l'énergie d'un système de courants est de l'énergie cinétique (et non pas potentielle, comme supposait la théorie de Neumann).

Il se limite à montrer que l'application des équations de Lagrange conduit aux mêmes résultats que la théorie de Neumann.

Ce fait nous semble être d'importance, étant donné que Poincaré à peu près à la même époque, va attacher une signification épistémologique à cette théorie de Maxwell, comme nous allons soutenir dans le chapitre prochain. Cela montre, à notre avis, le souci chez Mathieu d'éviter toute hypothèse sur la cause des phénomènes électrodynamiques. Nous relevons, cependant, une exception d'importance, en ce qui concerne la théorie de Weber :

"Weber a imaginé de considérer l'action de chaque molécule d'électricité positive ou négative d'un des éléments de courant sur chaque molécule d'électricité de l'autre élément de courant, et, par de certaines considérations physiques jointes à la supposition que l'expression analytique de cette action soit d'une forme simple, il fut conduit à la loi qui porte son nom; il vérifia ensuite que cette loi conduit à celle d'Ampère".<sup>29</sup>

Mathieu avait, d'ailleurs, consacré en 1880 un mémoire à la théorie de Weber.<sup>30</sup>

Mathieu se refuse, autrement, à accepter l'hypothèse d'Ampère sur les courants moléculaires.<sup>31</sup> Il reste partisan de la théorie du magnétisme développée dans sa Théorie du Potentiel (1885), et fondée sur les recherches de Poisson et de Clausius.

Comme Mathieu se limite dans cet ouvrage à l'étude de l'électrodynamique des corps conducteurs, il ne fait qu'exposer la première partie de l'électrodynamique de Helmholtz de 1870, où il n'est pas question des corps diélectriques. C'est à partir de l'introduction de l'hypothèse d'un milieu universel polarisable que Helmholtz va entreprendre la compa-

raison avec la théorie électromagnétique de Maxwell. Il n'est donc pas étonnant que Mathieu ne fasse aucune allusion à Maxwell dans ce contexte. En particulier, Mathieu ne donne aucune signification théorique aux valeurs qu'on peut attribuer au paramètre  $K$  de l'expression pour le potentiel électrodynamique de Helmholtz (voir Appendice B).

Il est d'ailleurs regrettable que Mathieu n'ait pas pu finir le tome VIII de son Traité de Physique Mathématique qu'il comptait consacrer aux théories de la lumière. Il est possible que Mathieu eût entrepris, alors, une comparaison entre les théories de Helmholtz et de Maxwell concernant la propagation d'ondulations électromagnétiques, dans le contexte d'une analogie avec la propagation de la lumière.<sup>32</sup>

SECTION IV.2 - BRILLOUIN ET SON ESSAI D'INTERPRETATION  
MECANIQUE DES THEORIES DE MAXWELL

L. M. Brillouin (1854/1948) a été l'antithèse même de ce physicien "normal" décrit par Kuhn, qui s'en tient farouchement à un seul "paradigme" toute sa vie, laissant à une nouvelle génération la tâche de développer le nouveau paradigme issue d'une "révolution scientifique".<sup>33</sup> La trajectoire scientifique de ce savant couvre une période particulièrement riche de l'histoire de la physique — celle qui correspond au passage du "classique" au "moderne" dans cette discipline — et il a su se mettre au pas des changements profonds qui se sont produits et participer à ses multiples phases.

Contemporain de Poincaré (ils sont nés la même année), Brillouin a cependant vécu bien plus longtemps, ce qui a suffi peut-être pour qu'il accepte la révolution relativiste, contrairement au premier.

Au début de sa carrière Brillouin a été un partisan du programme de réduction mécaniste des phénomènes physiques. Dans cette section nous analyserons un mémoire de ce savant, publié en 1887, où il se propose de contribuer à un fondement mécanique de la théorie électromagnétique de Maxwell. Il est significatif, dans ce contexte, de souligner l'intérêt que Brillouin a porté aux théories de W. Thomson, qu'il divulgue en France.<sup>34</sup>

Plus tard Brillouin rejettera l'électrostatique de Maxwell. Il va alors considérer les conséquences des théories du savant écossais non pas comme "rigoureuses", mais "approchées", des résultats limites de la théorie de Helmholtz.<sup>35</sup> Toutefois il adoptera, par la suite, la formulation Hertzienne de l'électrodynamique de Maxwell.<sup>36</sup>

Dans ses cours de 1902/3 et 1903/4 au Collège de France, Brillouin se situe déjà dans un autre champ théorique: la théorie des électrons de Lorentz, qu'il affirme reposer "sur une solide base expérimentale".<sup>37</sup>

Son raliement à la théorie des électrons ne lui a pourtant pas empêché d'admettre la théorie de la relativité restreinte.<sup>38</sup>

Finalement, il faut signaler son intérêt pour la théorie des gaz de Boltzmann, la Mécanique Statistique de Gibbs et ses contributions à la Physique Quantique.

Dans ce travail nous allons considérer Brillouin comme un représentant, à la fin des années 80, d'un courant en France qui a perçu le programme de Maxwell comme celui de construire une théorie mécanique complète des phénomènes électriques et magnétiques.

Le point de départ de l'article de Brillouin intitulé "Essai sur les lois d'élasticité d'un milieu capable de transmettre des actions en raison du carré de la distance" (1887), est la théorie de Maxwell des tensions et pressions dans le milieu diélectrique, exposée dans les chapitres V (1<sup>ère</sup> partie) et XI (4<sup>ème</sup> partie) du Treatise. Maxwell montre dans ces chapitres comment les actions électrostatiques et électromagnétiques peuvent être considérées comme des effets de l'action contigüe du milieu, supposé être dans un état de contrainte par la présence de corps (électrisés, magnétisés, ou transportant des courants électriques) dans le "champ".

Maxwell considérait cette théorie comme un premier pas vers une théorie mécanique complète des phénomènes électromagnétiques fondée sur l'hypothèse suivant laquelle les actions sont transmises de proche en proche et par milieu interposé. Malgré sa tentative dans le mémoire PH de rendre compte de l'état de contrainte du milieu, en supposant qu'il est le siège de mouvements tourbillonnaires, Maxwell avoue, dans le Treatise, ne pas avoir réussi à faire le "pas suivant", c'est-à-dire, "to account by mechanical considerations for these stresses in the dielectric"<sup>39</sup> Il n'y a pas de tentative, par exemple, d'expliquer l'état de contrainte du milieu par des propriétés élastiques attribuées à celui-ci. La seule allusion du Treatise à l'hypothèse des vortex moléculaires se fait dans le contexte d'une théorie de la rotation magnétique de la lumière polarisée, et sans avoir un lien direct avec la théorie de l'état de contrainte du milieu.

Brillouin est persuadé, toutefois, que la théorie des vortex moléculaires du mémoire PH, et ce qui reste de ses hypothèses dans le Treatise, prouvent au moins que Maxwell ne considérait pas le milieu électromagnétique (l'éther) comme ayant une constitution ordinaire:

"Le milieu capable de transmettre les actions électriques n'est pas un de ces milieux élastiques que l'on étudie dans la théorie ordinaire de l'élasticité, et dont les réactions

élastiques sont proportionnelles aux déformations".

Brillouin se propose donc de contribuer à faire le "pas suivant" souhaité par Maxwell :

"Il reste donc à découvrir les LOIS D'ELASTICITE d'un milieu simple ou composé, tel que les actions élastiques puissent s'exprimer en fonction de la force électrique ou magnétique au moyen des formules de Maxwell".<sup>40</sup>

Brillouin signale que son mémoire a un caractère **préliminaire**, où il "définit complètement la nature du problème et indique exactement la méthode qu'il convient de suivre pour le traiter". Il suggère, modestement, que Maxwell "devait être en possession, il y a plus de vingt-cinq ans, de tout ce qu'il y a d'exact dans les pages qui vont suivre...".<sup>41</sup>

Brillouin souligne la signification physique de cette recherche:

"... il est difficile d'échapper à la conviction de l'existence d'un ou plusieurs de ces milieux, au moins pour les phénomènes lumineux et électriques".

Ce problème "physique" doit, cependant, être dissocié du problème "philosophique" aux prises avec des hypothèses concernant le mode de transmission de l'action. Le physicien pourrait à la limite, refouler cette problématique philosophique au delà des dimensions accessibles à l'expérience :

"L'importance de la question n'est pas philosophique. Il ne s'agit nullement de savoir si l'on peut faire disparaître de la Science toute notion de force agissant à distance, mais seulement de savoir si les forces agissant à ces distances, que le physicien nomme grandes ou finies, peuvent être remplacées par les actions élastiques d'un milieu que le physicien peut considérer comme continu, parce qu'un volume de ce milieu inférieur à tout ce qu'on peut mesurer ( $< 10^{-21}$  millimètre cube, par exemple) jouit encore de toutes les propriétés d'un volume **appréciable**.

Ce milieu sera-t-il continu, au sens mathématique, ou formé de particules séparées ? Les actions élastiques s'exerceront-elles à distance entre les particules séparées ou seulement

au contact et par choc ? peu importe".<sup>41</sup>

La signification physique de cette recherche semble être posée dans le cadre des objections soulevées par W. Thomson à la théorie électromagnétique de la lumière :

"... sir W. Thomson s'élève fortement, à plusieurs reprises, contre la théorie électromagnétique de la lumière, qu'il regarde comme un retour en arrière, parce qu'elle n'est pas une théorie purement mécanique. Qu'une hypothèse mécanique rende compte de tous les phénomènes électriques, et les objections de sir W. Thomson auront perdu toute raison d'être".<sup>42</sup>

Plusieurs hypothèses mécaniques sont envisageables selon Brillouin. La lumière pourrait être associée aux déplacements des points d'un milieu, où à des déformations d'un élément de volume, etc.. Il s'agit, pour lui, de caractériser les propriétés de l'éther à partir des données disponibles :

"L'étude de l'Optique ne nous fournit donc aucun renseignement précis sur les actions élastiques mises en jeu; l'étude de l'Electricité nous en fournit: c'est de celle-ci qu'il faut partir pour remonter de proche en proche à la définition du milieu inconnu avec le minimum d'hypothèses".<sup>43</sup>

Ce "programme" de Brillouin est caractéristique des années 80 où l'électromagnétisme remplace graduellement l'optique comme une base d'investigation de la structure de l'éther.<sup>44</sup>

Il nous semble important, dans le contexte d'une caractérisation d'un approche mécaniste de l'oeuvre de Maxwell, d'analyser ici les hypothèses que Brillouin a cru être indispensables au développement de cette recherche.

1. Au départ il y a l'hypothèse selon laquelle "le milieu inconnu est un milieu MECANIQUE". Le qualificatif "mécanique" désigne ici la possibilité d'appliquer à ce milieu les lois de la Statique et de la Dynamique. Brillouin remarque que cette condition n'a rien de nécessaire mais qu'elle

s'impose si l'on veut éviter de rentrer "dans le domaine de la fantaisie". Il admet, toutefois, qu'on puisse être amené à changer cette hypothèse :

"Si, cependant, les propriétés qu'elle impose au milieu universel rendaient l'existence de celui-ci impossible, après examen approfondi, il n'est pas certain qu'on ne puisse découvrir les lois de la Dynamique spéciale de ce milieu, nécessaires pour que son existence rende compte à la fois des phénomènes physiques et de la Dynamique particulière de la matière ordinaire".<sup>43</sup>

Nous voyons dans cette remarque de Brillouin l'intuition d'un programme de recherches qui se développera à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, et qu'on appelle couramment "vision électromagnétique de la nature". Ce programme essayera, par une inversion symptomatique, de placer l'électromagnétisme à la base des recherches sur la nature du monde physique (et non pas la mécanique qui, jusqu'à cette époque, avait joué ce rôle). Il a fallu l'échec du programme mécanique pour que cette nouvelle approche puisse s'affirmer. L'équilibre ne s'est rétabli qu'avec la Théorie de la Relativité Restreinte.<sup>45</sup> Brillouin — il est clair — s'en tient ici au programme mécanique, mais il se trouvera plus tard parmi les savants français qui travailleront sur la théorie des électrons de Lorentz, qui a été à l'origine de la "vision électromagnétique de la nature".

2. Ensuite Brillouin signale que les états d'équilibre observés, peuvent être soit instantanés — c'est à dire, valables pour chaque point du milieu et à tout instant — soit moyens — ce qui ouvre la possibilité de concevoir des mouvements périodiques internes qui se compensent mutuellement.

3. Brillouin formule une troisième hypothèse: "Le milieu, s'il est unique ne subit que des déplacements continus".<sup>46</sup> Cette condition "exclut — soutient-t-il — les milieux à réactions élastiques proportionnelles aux déformations". D'après lui c'est pour "éviter cette condition" que Maxwell avait proposé, dans le mémoire PH, une structure complexe pour l'éther, qui serait composé de deux milieux: les cellules et les particules. Dans un tel cas "la distribution des forces élastiques nécessaire n'est qu'une

## distribution MOYENNE DANS L'ESPACE"

4. La dernière hypothèse concerne la difficile question du rapport entre le milieu et la matière. Brillouin considère que l'état des connaissances de l'époque engagerait à caractériser la présence d'un corps matériel par la variation de certains coefficients qui se rapportent uniquement à des propriétés du milieu :

"On continuera à attribuer entièrement au milieu la charge électrique, l'aimantation, le courant, en restreignant le rôle du corps matériel à la production de discontinuités locales dans le milieu universel. C'est une hypothèse qui, comme la première, n'a pour elle que l'impossibilité d'en choisir une autre qui ne soit pas encore plus arbitraire"<sup>46</sup>

Brillouin reste donc fidèle ici aux conceptions de Maxwell, qui ne faisait pas une distinction ontologique entre l'éther et la matière. Il va falloir attendre Lorentz pour que la séparation à laquelle Brillouin fait allusion s'intègre dans une théorie électromagnétique. La considération de processus microscopiques – absente chez Maxwell – sera essentielle pour effectuer cette séparation.<sup>47</sup>

La totalité du programme que propose Brillouin comprendra trois étapes.

D'abord il s'agit de rechercher "des expressions les plus générales des forces élastiques, en fonction des quantités qui définissent l'état du champ au même point". Cette étude, Brillouin nous le signale, a été déjà accomplie par Maxwell dans les chapitres V, 1<sup>ère</sup> partie, et XI, 4<sup>ème</sup> partie, du Treatise.

La deuxième étape aurait été envisagée par Maxwell, mais il n'a pas pu l'accomplir. Brillouin propose alors le programme suivant :

"Examen de chacun des trois modes d'explication distincts: 1° milieu unique ou double en état d'équilibre; 2° milieu unique ou double en état vibratoire permanent; 3° milieu unique ou double en état de rotation".

Pour chacune de ces possibilités il s'agira de retrouver les forces élastiques supposées dans l'étape antérieure. De cette façon on réussirait, dit-il, à donner une explication mécanique des grandeurs électriques et magnétiques comme "masse électrique", "courant électrique", etc.

"On aura ainsi des relations entre les quantités électriques et les quantités géométriques ou cinématiques qui définissent la déformation ou le mouvement permanent du milieu".<sup>48</sup>

Dans une dernière étape, la structure et le mouvement du milieu — compatibles avec les états d'équilibre **observés** dans le champ électro-magnétique — seront censés conduire aux lois des phénomènes calorifiques, et, en cas de réussite, déterminer la "nature de la **chaleur**".

Brillouin propose donc un programme ambitieux d'une théorie mécanique unitaire des phénomènes électriques, magnétiques, optiques et calorifiques.

"En procédant de proche en proche, il semble donc que l'état actuel de la science expérimentale permette de déterminer rigoureusement et de réduire à un très petit nombre les hypothèses cosmogoniques compatibles avec nos connaissances (...). Quelques difficulté que doivent présenter de pareilles recherches, il m'a paru pourtant intéressant de noter l'ordre dans lequel on peut employer les lois expérimentales pour déterminer de proche en proche, avec le minimum d'arbitraire, une ou plusieurs images mécaniques du monde physique, si toute fois il en existe".<sup>49</sup>

Le choix des Lois Expérimentales et l'Hypothèse  
sur le Siège de l'Énergie

Brillouin met en évidence que les lois expérimentales connues — la loi de Coulomb, les lois d'Ampère, etc. — sont supposées rigoureuses, quoiqu'elles n'aient pu être testées que dans des circonstances particulières. Leur validité pourrait être remise en cause éventuellement, si — suppose-t-il — des expériences conçues pour vérifier s'il y a une influence de la pesanteur sur les phénomènes électriques et magnétiques, ou une influence du mouvement de la Terre sur ces phénomènes; venaient à être réalisées. Certaines difficultés auxquelles il s'est buté dans le développement de son programme, l'ont conduit à considérer comme vraisemblable un lien entre la gravitation, l'électricité et le magnétisme :

"On a toujours supposé que la pesanteur et les forces électriques sont des forces indépendantes, sans qu'on l'ait jamais démontré; il n'est nullement évident que la composante, suivant une direction, de la force totale qui agit sur un corps, soit la somme de la composante de son poids et de la composante des attractions électriques qu'il subit d'après la loi de Coulomb, sans aucun terme qui dépende à la fois des attractions électriques et newtoniennes".<sup>50</sup>

Brillouin a bien voulu aussi fixer les limites d'application des lois expérimentales qui seront utilisées dans sa recherche. Dans ce sens il écarte les diélectriques et les corps magnétiques, qui présentent des propriétés qui rendent difficile l'application des lois alors connues. Parmi ces anomalies il range le phénomène d'absorption électrique ou celui de variation du pouvoir inducteur avec la charge électrique (ou la force électrique).

Il laissera aussi de côté les phénomènes qui dépendent du mouvement des corps dans le "champ", ou de la variation de l'intensité des courants qui, selon lui, il "est prudent de n'y point songer au début". Pour justifier ces restrictions Brillouin adopte une hypothèse qui — admet-il — peut se révéler fautive au cours des recherches :

"Une structure du milieu universel, capable de rendre compte des effets statiques, donnera immédiatement les équations des mouvements lents du milieu. Si ces équations fournissent l'explication des courants induits, ce sera une assez forte

présomption en faveur de ce milieu.

S'il n'en est pas ainsi, on devra tirer des lois des courants induits, les variations qui subissent les actions élastiques du milieu, lorsqu'elles sont rapidement variables au lieu d'être constantes".<sup>51</sup>

Après avoir montré l'analogie entre les lois de la gravitation et celles de l'électrostatique, Brillouin aborde la question centrale du siège de l'énergie. Il calcule le travail virtuel des forces électrostatiques et arrive, de la façon habituelle, aux deux expressions de l'énergie électrostatique d'un système électrique, dont l'une n'inclut que le potentiel, et l'autre le potentiel et les charges électriques<sup>52</sup> :

"Ces deux expressions, mathématiquement équivalentes, correspondent à deux interprétations physiques distinctes des phénomènes électriques, si l'on regarde la distribution de l'énergie comme représentée par l'élément intégré. D'après la première expression, l'énergie est répandue dans tout l'espace, proportionnellement au carré de la force électrique; l'énergie électrique a son siège dans l'espace qui environne les corps électrisés, et que l'on suppose occupé par un milieu matériel dont les actions élastiques produiraient les forces de Coulomb. La seconde expression, au contraire, donne pour siège à l'énergie la masse électrique elle-même. En l'absence de raisons expérimentales décisives, il est permis d'examiner les conséquences de la première manière de voir ...".<sup>53</sup>

Cette même hypothèse Brillouin est prêt à l'étendre, avec les modifications nécessaires, à la gravitation, comme Maxwell lui-même l'avait suggéré.<sup>54</sup>

En électrodynamique Brillouin va limiter ses recherches au cas des courants fermés pour lesquels la condition suivante est vérifiée :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad ,$$

où (  $u, v, w$  ) sont les composantes du courant.

Il montre qu'à partir du travail nécessaire pour transporter de l'infini un petit courant fermé d'intensité  $\lambda I$  à travers un champ magnétique on peut, de façon analogue au raisonnement fait pour l'électrostatique, obtenir les expressions pour l'énergie électrodynamique, dont l'une

inclue les courants, et l'autre seulement les composantes du champ magnétique<sup>55</sup> :

"Ici, comme au n° 11 - il se réfère à l'extrait cité plus haut - deux formes de l'énergie correspondent aux deux conceptions principales du mode d'action mutuelle, avec cette différence, pourtant, que la partie de l'énergie relative à un élément de courant n'appartient à celui-ci que s'il fait partie d'un courant d'intensité uniforme, fermé ou indéfini, dont la forme est d'ailleurs arbitraire. Adoptant la seconde expression, [celle où l'énergie est répandue dans le milieu] j'examinerai ses conséquences pour la nature du milieu interposé".<sup>56</sup>

Cette remarque est importante, comme Brillouin le signalera par la suite, puisqu'elle correspond à une différence essentielle entre l'électrodynamique de Maxwell et celle de Helmholtz.

Avant de passer à l'étude de l'élasticité du milieu, Brillouin fait la remarque que les expressions obtenues pour l'énergie électrostatique et pour l'énergie électrodynamique peuvent s'avérer incomplètes. Il faudrait, éventuellement - dit-il - inclure des "termes correspondant aux actions mutuelles de la matière pesante et des corps électrisés, des corps électrisés et des courants, etc."<sup>56</sup>

### Les Propriétés Élastiques du Milieu

Brillouin va restreindre ses investigations à un milieu capable de supporter un état de contrainte, comme celui supposé par Maxwell dans le mémoire PH et dans le Treatise. Il ne prendra pas en considération, par décision méthodologique, des théories comme celle de Helmholtz :

"Considérons un milieu élastique dont les actions tangentielles sont égales deux à deux, incapable, par conséquent, de résister à un couple proportionnel à l'élément de volume et de rendre compte des actions magnétiques élémentaires, ni même des actions électrodynamiques, si l'hypothèse de Helmholtz est exacte".<sup>57</sup>

Brillouin fait sûrement référence ici à l'électrodynamique de Helmholtz de 1870, où ce savant introduit l'hypothèse d'un milieu passible de polarisation diélectrique et magnétique. Helmholtz suppose que l'action à distance des forces externes peut engendrer un moment électrique et/ou un moment magnétique dans le milieu. Dans cette théorie l'expression de l'action électrodynamique est telle que chaque élément d'un circuit parcouru par un courant électrique, subit l'action d'un couple de forces appliquées aux extrémités de l'élément (voir Appendice B).

Il est curieux que Brillouin fasse cette remarque, étant donné que l'électrodynamique de Helmholtz est basée sur la conception d'une action à distance, et, donc, ne suppose pas un milieu qui serait le relais de la transmission de l'action. Brillouin le signale d'ailleurs dans une note au passage que nous venons de citer :

"Cette hypothèse, d'ailleurs, attribuant à chaque élément de courant sa part d'énergie indépendamment du reste du courant fermé, paraît plutôt conforme à la conception d'actions directes à distance qu'à celle de transmission par un milieu".

La première initiative de Brillouin va donc être celle de vérifier si les expressions données par Maxwell pour les efforts dans le milieu (nécessaires pour rendre compte, par action contigüe, des forces électrostatiques et électrodynamiques) sont les plus générales. Il conclut que les expressions les plus générales sont celles données par Maxwell, auxquelles il ajoute des constantes arbitraires qui désignent "une déformation homogène du milieu produite par des causes extérieures quelconques".<sup>58</sup>

Les recherches de Brillouin se poursuivront en choisissant le premier des "modes d'explication" auxquels il a fait référence auparavant, à savoir, celui où l'on pose l'existence d'un milieu unique, homogène et isotrope, en état d'équilibre. Il s'agira de rechercher les déformations

de ce milieu compatibles avec les efforts supposés (qui sont, essentiellement, ceux donnés par Maxwell). Nous nous limiterons ici à présenter les principales conclusions de Brillouin.

La première nous concerne plus particulièrement. Brillouin donne trois preuves différentes de la proposition :

"Le milieu inconnu n'est pas un milieu élastique ordinaire à actions élastiques proportionnelles aux déformations".<sup>59</sup>

Nous remarquons ici que Mathieu est arrivé à la même conclusion, qui l'a fait écarter la possibilité de considérer le diélectrique comme un milieu solide ordinaire. Poincaré arrivera à des conclusions analogues; mais suivant un raisonnement différent de celui de Brillouin et Mathieu.<sup>60</sup>

Brillouin prouve, d'une façon plus générale, "qu'il est impossible de trouver une expression directe des déformations (...) en fonction de la force au même point". En d'autres termes, pour un milieu qui vérifie les expressions de Maxwell, on ne peut pas partir des forces élastiques locales et trouver les déformations sans avoir recours à des intégrations (c'est-à-dire, sans connaître la distribution globale des forces élastiques et les conditions de continuité). Brillouin souligne que cette possibilité correspond, seulement, aux milieux solides ordinaires où, justement, les déformations sont proportionnelles aux efforts.<sup>61</sup>

Dans la recherche que Brillouin entreprend des lois d'élasticité de ce milieu particulier, il considère le cas où les déformations peuvent être considérées comme très petites, ce qui permet l'application du principe du travail virtuel. Il obtient, par l'introduction des efforts de Maxwell, les équations qui expriment de lien entre les efforts et l'énergie de déformation du milieu.<sup>62</sup>

Nous devons souligner que Brillouin introduit, pour résoudre ces équations :

- 1- Les équations entre effort et énergie de déformation pour les actions gravitationnelles.

- 2- Les expressions de l'énergie électrostatique et électrodynamique dans l'hypothèse que ces énergies sont repandues dans le milieu.

Brillouin arrive, notamment, à la conclusion que le milieu ne peut pas être incompressible.<sup>63</sup>

Toutes ces conclusions sont résumées ainsi :

"Si les lois de Coulomb et d'Ampère représentent en toute rigueur mathématique et à toute distance les lois d'action des masses électriques ou de courants situés en un point quelconque de l'univers, il est impossible de rendre compte de l'un ou l'autre de ces systèmes de forces par la déformation statique permanente, infiniment petite, d'un milieu unique."<sup>64</sup>

Cette "conclusion négative" est, toutefois — comme le signale Brillouin — dépendante des hypothèses suivantes (qu'il est disposé à remettre en cause) :

- 1- Les déformations du milieu sont infinitésimales, pour des forces, par contre, finies;
- 2- Les lois de Newton, Coulomb et Ampère "sont l'expression complète de la réalité";
- 3- Il y a une indépendance entre les phénomènes électriques et les phénomènes gravitationnels.
- 4- Il y a une indépendance entre les actions électrostatiques et les actions électrodynamiques.

C'est dans le sens d'une modification de ces hypothèses que Brillouin se propose de poursuivre les recherches. Nous remarquons qu'il se montre plus prêt à envisager des modifications dans ces hypothèses (ayant un caractère fondamental) que d'adopter l'hypothèse d'un milieu double (en état d'équilibre vibratoire ou rotationnel).

Les conclusions de son article mettent en évidence son attachement à ce programme d'unification, par la Mécanique, des domaines de la physique :

"Je me suis décidé à publier dès à présent ce Mémoire, sans attendre d'avoir terminé les recherches complémentaires que je viens d'indiquer; malgré le caractère négatif des conclusions immédiates, j'espère qu'il rendra quelques services en précisant l'ordre et la nature des difficultés de ce problème, dont la solution, abandonnée par Maxwell, reste encore à découvrir".<sup>65</sup>

### La Permanence de l'Idéal Mécaniste chez Brillouin

Nous avons des éléments qui permettent d'attester la permanence chez Brillouin de l'idéal mécaniste dans le domaine de l'électricité, du magnétisme et de l'optique aussi tard qu'en 1895.

Dans son Compte Rendu datant de 1891 de l'ouvrage Electricité et Optique de Poincaré, Brillouin fait référence aux résultats négatifs de son "Essai" de 1887, mais il soutient toujours le bien fondé d'un tel projet :

"... les difficultés que l'on rencontre dans la théorie de Maxwell pour l'Electrostatique (...) me portent à attribuer de plus en plus d'importance aux essais même incomplets de théorie mécanique de l'électricité".<sup>66</sup>

Nous aurons l'opportunité de revenir à ce Compte Rendu dans le chapitre consacré à Poincaré.

Dans ses "Notes" aux Conférences Scientifiques et Allocutions de W. Thomson, Brillouin épouse la même conception que ce savant sur l'importance des modèles mécaniques pour la "compréhension" des phénomènes physiques :

"Doit-on se contenter -- affirme Brillouin -- d'avoir traduit en équations une partie des lois des phénomènes électriques et borner là sa curiosité ? Je ne le crois pas; je pense, avec bon nombre de physiciens, que le désir de COMPRENDRE est légitime et fructueux, et c'est à Sir W. Thomson que j'emprunterai la définition de ce mot".

Brillouin cite, alors, les fameuses déclarations de W. Thomson dans Molecular Dynamics, où ce savant souligne son besoin de faire appel à des "modèles mécaniques" comme condition nécessaire à une compréhension des phénomènes physiques.

Brillouin continue alors :

"Il résultait de considérations en partie hypothétiques développées par Maxwell en 1865 qu'une force électromotrice et une force magnétique périodiques doivent se propager comme la lumière, la force magnétique étant constamment perpendiculaire à la force électromotrice. On sait avec quel éclat les parties principales de ces prévisions ont été confirmées par les expériences de M. Hertz. L'identité de la chaleur rayonnante et de la lumière, la conversion de la chaleur en travail mécanique d'une part, l'explication si complète que fournissent les théories mécaniques des phénomènes lumineux d'autre part, ne laissent guère place au doute sur la nature mécanique de ceux-ci. Il est donc vraisemblable que l'une des deux quantités, force magnétique ou force électromotrice, est identique à l'une des quantités, déplacement, rotation, force élastique, ou force motrice, etc. qui définissent mécaniquement le même phénomène lumineux".<sup>67</sup>

Ce passage montre d'une façon remarquable que les expériences de Hertz n'ont pas été considérées par une partie des scientifiques au moins, comme marquant la fin du programme de théories éther-élastiques de la lumière, ni, non plus, comme un argument en faveur de la dé-mécanisation des phénomènes électromagnétiques. De toute évidence, les deux causes principales de cette dé-mécanisation ne seront pas ces expériences mais la formulation Hertzienne de la théorie de Maxwell d'une part, et la théorie des électrons de Lorentz d'autre part. Brillouin adoptera plus tard ces théories, ce qui montre probablement son abandon de l'idéal mécaniste, au moins dans la forme qu'il prend dans son "Essai" de 1887.

Mais en 1895 Brillouin, tout en nuancant ses positions, défend encore les tentatives d'explication mécanique des phénomènes physiques. Cette année la Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées a publié l'article "La déroute de l'atomisme contemporain" de F. W. Ostwald qui a été à l'origine d'une chaude controverse entre ce savant, d'un côté, et les physiciens français Cornu et Brillouin, de l'autre côté.

Sans vouloir exposer l'intégralité de cet article, dont la problématique sort du cadre de notre travail, Ostwald y attaque toute forme de "théorie mécanique" des phénomènes physiques, et il prêche pour son remplacement par une "théorie énergétique". Un des exemples que donne Ostwald de sa thèse selon laquelle toute théorie mécanique se heurte un jour ou l'autre "à une contradiction inévitable entre les faits constatés par l'expérience et les faits prévus par la théorie", est celui de la "théorie des ondulations". Il désigne ainsi les théories de la lumière qui ont été proposées depuis Huyghens et Euler, jusqu'à celles de Fresnel et ses successeurs au XIX<sup>ème</sup> siècle. Ostwald affirme que (...)

"... à notre époque cette théorie a été enterrée sans bruit, pour faire place à la théorie électro-magnétique. Faisons l'autopsie de son cadavre — poursuit-il — ... elle a péri par ses parties mécaniques".

Ostwald signale notamment l'hypothèse d'un éther se comportant comme un solide élastique, qui était au fondement de la "théorie des ondulations", et les difficultés insurmontables auxquelles elle s'était heurtée. Il soutient que Hertz aurait réussi à libérer la théorie électro-magnétique de cette hypothèse :

"Pour épargner pareil sort à la théorie électromagnétique, actuellement adoptée, l'immortel Hertz, auquel elle doit tant, renonce expressément à y voir autre chose qu'un système de six équations différentielles. Cette conclusion parle plus puissamment que je ne pourrais le faire contre tous les essais de théorie mécanique tentés auparavant".<sup>68</sup>

Ostwald soutient qu'il faut "renoncer aux atomes, à la Mécani -

que", et que la physique "n'a besoin d'aucune image, d'aucun symbole". Sa conception de la théorie physique est franchement opérationnaliste :

"Etablir les rapports entre des réalités, c'est-à-dire des grandeurs tangibles, mesurables, de telle sorte que, les unes étant données, les autres s'en déduisent, voilà la tâche de la science: et la science ne l'a pas remplie quand elle se paie d'une image plus ou moins hypothétique".<sup>69</sup>

Le moyen d'y arriver, selon Ostwald, est de "ramener les lois naturelles aux lois des diverses formes de l'énergie". Pour lui la "matière" n'est qu'une "invention", la seule "réalité effective" étant l'énergie. La théorie énergétique est pour lui la théorie la plus "générale disponible" à ce jour et, donc, la plus adéquate à "l'intelligence de la nature".<sup>70</sup>

La réponse de Cornu à Ostwald est d'une extrême virulence, ce savant étant traité de "feuilletoniste irresponsable".<sup>71</sup> Cornu conteste le point de vue de Ostwald en affirmant que "la conception cartésienne est en pleine floraison", et que les "agents physiques (...) viennent se ranger peu à peu dans le domaine soumis aux axiomes de la Mécanique rationnelle ...".

Le "titre de gloire" de Hertz est pour Cornu "d'avoir ramené (...) l'induction électrique dans l'espace aux ondulations à vibrations transversales et d'avoir montré qu'elle se propage par le même mécanisme et avec la même vitesse que la lumière".

Selon Cornu la recherche d'une théorie mécanique complète des multiples phénomènes physiques doit être la tâche fondamentale de la physique:

"Le grand obstacle auquel on vient se heurter au fond de toutes les théories est l'ignorance où nous sommes de la structure intime des corps pondérables et du milieu impondérable existant jusque dans le vide. Dans quelle mesure la connaissance exacte de cette constitution est-elle nécessaire pour expliquer mécaniquement les phénomènes physiques ? C'est là le grand problème: pourquoi désespérer de le résoudre et le déclarer absurde A PRIORI ?"

Brillouin, dans sa réponse "Pour la matière" est beaucoup plus

pondéré que Cornu. Il soutient que la connaissance d'un phénomène exige le passage des "qualités" à une "substance qui possède ces qualités". Cette substance il l'appelle, par "clarté" et "briéveté du langage", la "matière".

Il dénonce la "rapide exécution" de la "théorie mécanique des ondulations" par Ostwald, et met en évidence que la théorie électromagnétique de la lumière n'a pu s'établir que moyennant les hypothèses de Maxwell. Il se réfère ici, vraisemblablement, aux hypothèses mécaniques du mémoire PH de Maxwell, qui ont fondé le projet d'une théorie électromagnétique de la lumière. Brillouin se refuse également à accepter l'appréciation de Ostwald concernant la "contribution fondamentale" de Hertz à l'histoire de la physique.

Brillouin affirme, par la suite, que "nos connaissances sont essentiellement personnelles et subjectives" et que les "représentations du monde" sont "inévitables". Il défend le "droit" de chaque individu à choisir le mode de représentation qui lui convienne :

"Tout le monde ne se joue pas facilement dans l'abstraction et, — sans contester que ce soit un exercice utile par sa difficulté même, — on peut bien choisir un autre tableau de correspondance entre les phénomènes extérieurs et d'autres phénomènes plus simples, qu'on connaît mieux, dont on saisit mieux l'enchaînement. Il ne paraît guère contestable que, dès le début de la vie, l'expérience quotidienne familiarise un très grand nombre de personnes avec les phénomènes mécaniques. Pour celles qui ont quelque habitude de VOIR les phénomènes mécaniques, de les enchaîner intuitivement, — comme d'autres font pour les mots ou les équations différentielles, — je réclame donc le droit d'employer les images mécaniques, et de dresser le tableau à double entrée, — images mécaniques d'un côté, faits physiques de l'autre, — sans être excommuniés ou traités de retardataires".<sup>72</sup>

Les arguments de Brillouin sont ici moins d'ordre épistémologique que d'ordre psychologique. A notre avis cela démontre l'affaiblissement de l'idéal mécaniste chez ce savant, et un glissement vers une réflexion qui rappelle la classification Duhemienne de différentes sortes d'esprits et les théories qui leur sont plus adéquates.

Le pluralisme méthodologique est, chez Brillouin, une conséquence d'un agnosticisme épistémologique doublé d'une constatation psychologique :

"Que faut-il donc exiger, puisque nous ne pouvons certainement pas connaître le monde tel qu'il est ? C'est que chacun choisisse une manière de raisonner sur le monde, qui soit juste autant que possible, c'est-à-dire qui donne une exacte correspondance entre l'enchaînement des faits et l'enchaînement des symboles – et surtout qui soit rapide, intuitive et féconde ; il est impossible qu'une seule et unique méthode convienne à tous".

Cette conception se rapproche beaucoup plus des conceptions de Poincaré que de celles de Duhem. Nous verrons que ce dernier critiquera en effet, le critère de fécondité appliqué à l'évaluation de la théorie physique, ainsi que le type de pluralisme méthodologique que défendent Brillouin et Poincaré.

En tout cas la trajectoire scientifique de Brillouin semble être une réalisation de cette maxime qu'il lance à la fin de son article: "Pour la liberté et pour la matière".

Dans les prochains chapitres nous étudierons une nouvelle phase de la réception en France des théories de Maxwell en électricité et en magnétisme, caractérisée par la critique de l'idéal d'explication mécanique des phénomènes physiques. Cette critique, chez Poincaré et chez Duhem, s'appuyera sur une réflexion épistémologique approfondie motivée, au moins en partie, par l'entreprise théorique Maxwellienne.

## C H A P I T R E V

### LA PLACE DE L'OUVRAGE ELECTRICITE ET OPTIQUE DE H. POINCARÉ DANS LA RECEPTION DES THEORIES DE MAXWELL EN FRANCE

-----

SECTION V.1- LES FONDEMENTS EPISTEMOLOGIQUES DE DEUX LECTURES DU <u>TREATISE</u>	p.136
- J. Bertrand et le "Lecteur Français"	p.143
- J. Boussinesq et l'Exigence Mécaniste vis-à-vis de la Théorie Electromagnétique de la lumière	p.145
- Remarques sur la Lecture du <u>Treatise</u> par Poincaré	p.147
SECTION V.2- LES INCONSISTANCES DE L'ELECTROSTATIQUE DU <u>TREATISE</u> SELON POINCARÉ	p.149
- La Théorie du "Fluide Inducteur" de Poincaré	p.151
- L'Elasticité du "Fluide Inducteur"	p.154
- L'Interprétation Mécanique de la grandeur "Potentiel Electrostatique"	p.158
- Poincaré et l'Incompatibilité chez Maxwell de la Théorie du Déplacement Electrique et de la Théorie de l'Etat de Contrainte du Milieu	p.161
- Des Eléments en vue d'une Appréciation de la Criti- que de l'Electrostatique du <u>Treatise</u> par Poincaré	p.165
SECTION V.3- LA COMPARAISON ENTRE LES THEORIES DES MILIEUX DIELECTRIQUES DE POISSON-MOSSOTTI ET DE MAXWELL	p.171
- La Théorie des Cellules Electriques de Poincaré	p.176
- La Définition de la Grandeur "Déplacement Electri- que" dans la Théorie de Poisson-Mossotti	p.177

- Le Pouvoir Inducteur Spécifique et la Fonction Potentiel Electrostatique dans la Théorie de Poisson-Mossotti	p.179
- Le "Passage" de la Théorie de Poisson-Mossotti à la Théorie du Déplacement Electrique	p.182
- Que suppose l'Equivalence Observationnelle de la Théorie de Poisson-Mossotti et de la Théorie des Cellules ?	p.185
 SECTION V.4- LE CHOIX ENTRE LES THEORIES DE HELMHOLTZ ET DE MAXWELL	 p.189
- <u>Electrostatique</u> : Le Paramètre de Poincaré	p.192
- La Condition de Passage à l'Electrostatique de Maxwell	p.196
- Comparaison des Démarches des Volumes I et II de <u>Electricité et Optique</u> relatives au Passage de la Théorie de Poisson-Mossotti à l'Electrostatique de Maxwell	p.199
- <u>L'Electrodynamique</u>	p.202
- <u>La Propagation des Perturbations Electromagnétiques</u>	p.203
- Les Théories de Helmholtz et de Maxwell et l'Expérience	p.207
- Le "Principe de l'Unité de la Force Electrique" et le choix en faveur de la Théorie de Maxwell	p.208
 SECTION V.5- APERCU DES OPTIONS THEORIQUES DE POINCARÉ APRES 1890	 p.213
- L'Elargissement du Champ Théorique	p.216

Plusieurs études ont été consacrées ces dernières années aux contributions de H. Poincaré (1854/1912) dans le domaine de la physique.<sup>1</sup> Elles concernent, pour la plupart, la protohistoire de la théorie de la relativité restreinte et la participation de Poincaré au programme de Lorentz d'une théorie des électrons.

A notre connaissance il n'existe pas d'études approfondies sur les leçons de Poincaré faites à la Faculté des Sciences de Paris à la fin des années 80 et au début de la décennie suivante, notamment de l'ouvrage Théorie mathématique de la lumière (publié en 1889), qui reproduit les leçons professées pendant le premier semestre 1887/8, et de l'ouvrage Electricité et Optique (le premier volume a été publié en 1890 et le deuxième en 1891) qui reproduit les leçons professées respectivement de mars à juin 1888 et de mars à juin 1890.

Il est vrai que les introductions de ces deux ouvrages, reproduites partiellement dans La Science et l'Hypothèse,<sup>2</sup> comptent parmi les passages les plus cités de l'oeuvre de Poincaré. Cependant, sous cette forme ces introductions présentent l'inconvénient de se trouver détachées des ouvrages originaux et donc du contexte historique dans lequel elles ont été écrites, ce qui rend difficile une juste compréhension de leur portée.

Ces deux ouvrages ont en outre une importance incontestable, qui ne peut pas être perçue par un simple examen de leurs introductions. Ainsi certaines conceptions épistémologiques de Poincaré semblent y prendre racine. Ces ouvrages constituent aussi l'amorçement d'une oeuvre d'une oeuvre scientifique qui va refléter admirablement la crise de la physique que nous appelons aujourd'hui "classique".

Dans ce chapitre nous allons entreprendre une analyse détaillée de l'ouvrage Electricité et Optique, dans la perspective d'une histoire de la réception en France des théories de Maxwell en électricité et en

magnétisme. Si cet enjeu reste le principal, nous avons toutefois été conduits à aborder des questions qui dépassent cette problématique. La richesse des analyses de Poincaré a été pour beaucoup dans cet élargissement de perspective. Mais cela s'est imposé surtout en raison d'un objectif que nous avons fixé: comparer certains des choix théoriques de Poincaré, avec ceux de son contemporain P. Duhem, dans leur insertion singulière dans le développement de la physique à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Nous espérons ainsi jeter un jour nouveau sur les "programmes" de ces deux savants français, et, de cette façon, mieux comprendre la dernière phase de la réception des théories de Maxwell en France.

Les deux volumes de Electricité et Optique ont comme sous-titre respectivement: "Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière" et "Les théories de Helmholtz et les expériences de Hertz". Les leçons qui sont à l'origine de chacun de ces volumes ont été professées avec deux années d'intervalle. Un événement majeur a eu lieu entre-temps: la découverte par Hertz, dans le deuxième semestre de 1888, que les ondes électromagnétiques se propagent avec une vitesse finie.

Dans les leçons de 1887/8 Poincaré exposait donc "les idées de Maxwell" en attendant une expérience cruciale qui permette d'étayer ces idées et de décider en faveur de la théorie du savant écossais sur sa concurrente: la théorie de Helmholtz.

Ces deux ensembles de leçons constituent, ainsi, des documents précieux pour évaluer l'éventuel impact que l'expérience de Hertz a pu avoir sur Poincaré, et, d'une façon plus générale, sur la communauté scientifique de l'époque.<sup>3</sup>

Une question cependant doit être posée: dans quelle mesure les ouvrages de 1890 et de 1891 peuvent être considérés comme une reproduction fidèle des leçons données à la Faculté des Sciences? Y-a-t-il eu des modifications apportées en vue de la publication?

La réponse à cette dernière question est affirmative. D'abord

L'Introduction de l'ouvrage de 1890 a été sûrement écrite après l'expérience de Hertz, puisque Poincaré la mentionne :

"La science a marché avec une rapidité que rien ne permettait de prévoir au moment où j'ai ouvert ce cours. Depuis cette époque la théorie de Maxwell a reçu, d'une manière éclatante, la confirmation expérimentale qui lui manquait"<sup>4</sup>

Cette introduction est même postérieure aux leçons de 1890 sur l'électrodynamique de Helmholtz et les expériences de Hertz, et elle a donc été écrite au moins deux ans après les leçons reproduites dans le premier volume.

Le volume I de Electricité et Optique a été, en plus, "rédigé, rémanié et étendu" par Blondin, qui a recueilli les leçons de Poincaré. Des remaniements ont été sûrement effectués dans le chapitre sur la théorie électromagnétique de la lumière (qui fait état de l'expérience de Hertz<sup>5</sup> de 1888) :

"Je n'avais pu exposer dans mes leçons — affirme Poincaré — que les premières expériences de Rontgen et de Hertz, auxquelles les conquêtes les plus récentes et plus complètes de ce dernier savant ont enlevé beaucoup d'intérêt. M. Blondin a donc dû remanier et étendre considérablement cette partie du cours".<sup>6</sup>

Nous supposerons, dans quelques analyses qui seront faites par la suite, que le restant de l'ouvrage n'a pas subi de remaniements importants, et qu'il reflète donc, fidèlement, l'esprit des leçons de 1888.

L'enjeu qui nous semble central, et qui a déterminé le choix des thèmes qui seront analysés dans ce chapitre, est celui d'une interdépendance entre l'épistémologie de Poincaré et sa réception des théories de Maxwell.

La structure même de l'ouvrage est déjà révélatrice d'une certaine idée du travail scientifique chez ce savant. Il se propose d'abord de faire une exposition critique des principales théories qui étaient en jeu à l'époque, en essayant de les éclaircir et de mettre en évidence les difficultés qui éventuellement subsistaient.

Le deuxième volet de son entreprise est de comparer les théories entre elles de façon à faire éclater leurs similitudes et différences.

Finalement Poincaré essayera de faire un choix à partir de certains critères, parmi lesquels figure l'accord avec les données expérimentales disponibles.

Dans chacun de ces niveaux d'analyse nous allons essayer de dégager les composantes méta-scientifiques de la démarche de Poincaré.

Dans la dernière section du chapitre nous donnerons un aperçu de ses contributions dans le domaine de l'électricité et du magnétisme au delà de 1891, et qui se trouvent en droite ligne des analyses de l'ouvrage Electricité et Optique. Cette section va permettre, comme nous avons fait allusion plus haut, de rendre compte de la divergence des perspectives de Poincaré et de Duhem.

SECTION V.1- LES FONDEMENTS EPISTEMOLOGIQUES DE DEUX  
LECTURES DU TREATISE

Nous allons soutenir que l'introduction de l'ouvrage Electricité et Optique peut être considérée comme une confrontation entre deux lectures du Treatise de Maxwell: l'une, traditionnelle, d'un "lecteur français", présentée dans ses traits paradigmatiques, à laquelle Poincaré oppose une lecture novatrice qui aura une importance historique considérable. Nous croyons que ces deux lectures sous-entendent des épistémologies rivales, et que le Treatise devient un enjeu de taille dans une controverse qui déborde les aspects strictement scientifiques de l'entreprise théorique Maxwellienne.

Poincaré présente, initialement, une lecture du Treatise que nous pourrions caractériser comme mécaniste et réaliste par rapport à l'objet assigné aux théories physiques<sup>7</sup>. Dans cette perspective les théories de Maxwell seraient prises comme des tentatives de donner une explication mécanique des phénomènes électriques et magnétiques. Cette explication est supposée refléter la nature objective (l'essence) de ces phénomènes.

Du point de vue de cette lecture les théories de Maxwell auraient été plutôt mal reçues en France, si l'on en croit Poincaré :

"La première fois qu'un lecteur français ouvre le livre de Maxwell, un sentiment de malaise, et souvent même de défiance se mêle d'abord à son admiration".<sup>8</sup>

Poincaré explique cette réaction comme le résultat, d'abord, d'une non conformité des théories de Maxwell à un certain idéal de l'explication physique chez ce "lecteur français":

"Derrière la matière qu'atteignent nos sens et que l'expérience nous fait connaître, il voudra voir une autre matière, la seule véritable à ses yeux, qui n'aura plus que des qualités purement géométriques et dont les atomes ne seront plus que des points mathématiques soumis aux seules lois de la Dynamique".<sup>9</sup>

Cette ontologie mécaniste est vraisemblablement d'inspiration Laplacienne.

La théorie d'un système de courants électriques, proposée par Maxwell dans la 4<sup>ème</sup> partie du Treatise, ne s'appuierait, selon Poincaré, sur aucune ontologie de ce type :

"Le lecteur se trouve ainsi en présence d'une forme presque vide de matière qu'il est d'abord tenté de prendre pour une ombre fugitive et insaisissable".<sup>10</sup>

Poincaré souligne que la quête chez le "lecteur français" de ce type particulier d'explication, correspond à une conception qui attribue aux théories physiques l'objet<sup>11</sup> de révéler une "réalité" au delà de ce que révèle l'expérience. Les théories doivent, d'après cette conception, "pénétrer le secret de l'Univers", et déceler la "nature des choses". Cette "réalité" doit, toutefois, être construite à partir des éléments posés par l'ontologie décrite plus haut, ce qui révèle le caractère "essentialiste" de cette épistémologie : la théorie physique doit fournir des "explications ultimes" des phénomènes.

A part ces types d'exigences, le "lecteur français" s'attend également à ce que la théorie physique présente des caractéristiques particulières concernant son structure. D'abord elle ne doit pas montrer "la moindre apparence de contradiction". Il demande ainsi que ses "diverses parties en soient logiquement reliées les unes aux autres et que le nombre d'hypothèses distinctes soit réduit au minimum".

Les théories de la tradition de physique mathématique française seraient des modèles pour ce "lecteur français". Poincaré prend comme exemple les théories de Laplace et de Cauchy :

"Partant d'hypothèses nettement énoncées, ils en ont déduit toutes les conséquences avec une rigueur mathématique, et les ont comparées ensuite avec l'expérience".<sup>12</sup>

Le "lecteur français" reprocherait alors au Treatise, le manque de "précision" et l'incompatibilité "logique" des théories qui y sont développées.

Une certaine lecture de Maxwell s'appuierait, donc, sur une épistémologie qui assigne un certain objet à la théorie physique, définit une certaine ontologie qui va nourrir ses hypothèses de base, et fixe des normes concernant son structure.

Poincaré soutient que les "vraies intentions" de Maxwell échappent à ce lecteur français: il y aurait une lecture du Treatise plus fidèle à l'esprit de cet ouvrage. Cette autre lecture deviendra, par la suite, un instrument de la critique que Poincaré va déployer contre l'épistémologie esquissée plus haut.

Nous allons soutenir que Poincaré ne fait pas une lecture plus fidèle aux intentions de Maxwell. Dans l'ouvrage Electricité et Optique il présente, en fait, une autre approche du Treatise tout aussi compromise avec une certaine épistémologie.

Un des traits les plus caractéristiques de cette nouvelle lecture est sa sensibilité particulière au changement méthodologique qui s'opère entre le deuxième et le troisième des mémoires de Maxwell. Ce savant abandonne alors sa théorie mécanique des vortex moléculaires, et la remplace par une théorie dynamique du champ électromagnétique. Ce tournant méthodologique s'affirme complètement dans le Treatise, avec l'application des équations de Lagrange à l'étude d'un système de courants électriques. Poincaré privilégie nettement cette dernière théorie aux dépens des autres, plus immédiatement mécaniques, du Treatise.

Cette lecture est complètement novatrice, comme il ressort des analyses que nous avons faites jusqu'ici des travaux de ses prédécesseurs français. Ceux-ci concentraient effectivement leurs analyses, sur l'électrostatique du Treatise et sur la théorie électromagnétique de la lumière; l'application des équations de Lagrange à l'électromagnétisme était, soit ignorée, soit présentée sans commentaires particuliers.

Quand Poincaré introduit la théorie de Maxwell d'un système de courants électriques dans le chapitre IX d'Electricité et Optique, il affirme: "... nous touchons ici, à ce que je crois, à la vraie pensée de Maxwell". La théorie du déplacement électrique ou celle de l'état de contrainte du milieu diélectrique sont présentées, par contre, comme des théories fondées sur des hypothèses "provisoires". Ces hypothèses — affirme Poincaré — "... tout en nous satisfaisant mieux que l'hypothèse de deux

fluides, (...) n'avaient pas même aux yeux de leur auteur, plus de réalité objective".<sup>13</sup>

Poincaré donne en fait, à l'application des équations de Lagrange à l'électromagnétisme, une dimension épistémologique. Cette théorie du Treatise va correspondre non seulement à la "vérité" du projet Maxwellien, mais elle deviendra aussi une évidence de la vanité de toute quête d'explications mécaniques complètes en Physique. Poincaré va prouver, effectivement, qu'étant donné une explication mécanique complète d'un phénomène physique, on peut toujours proposer une infinité d'autres qui s'accordent aussi bien avec les lois révélées par l'expérience. Une analyse sur les propriétés du formalisme Lagrangian, va lui permettre d'étayer cette thèse.

Il va sans dire que la preuve de Poincaré s'est sûrement inspirée de Maxwell, auquel on doit une des premières tentatives d'application des équations de Lagrange en dehors de la Mécanique. Nous trouvons également, dans le Treatise, une thèse analogue à celle de Poincaré. En se référant à la théorie des vortex moléculaires qu'il avait proposée dans le mémoire PH, Maxwell affirme :

"The attempt which I then made to imagine a working model of this mechanism must be taken for no more than it really is, a demonstration that mechanism may be imagined capable of producing a connexion mechanically equivalent to the actual connexion of the parts of the electromagnetic field. The problem of determining the mechanism required to establish a given species of connexion between the motions of the parts of a system always admits of an infinite number of solutions. Of these, some may be more clumsy or more complex than others, but all must satisfy the conditions of mechanism in general"<sup>14</sup>

Maxwell n'a jamais abandonné, cependant, le projet d'arriver à une théorie mécanique complète des phénomènes électriques et magnétiques, comme d'autres passages du Treatise en témoignent.<sup>15</sup>

Poincaré va fournir la preuve de cette thèse qu'il soutient avec Maxwell. Nous allons l'exposer par la suite.

"L'interprétation mécanique" d'un phénomène physique est obtenue, selon Poincaré, quand on arrive "à l'expliquer soit par les mouvements de la matière ordinaire, soit par ceux d'un ou plusieurs fluides hypothétiques".<sup>16</sup>

Il considère le cas où cette matière ou fluide est supposée avoir une structure moléculaire. Le mouvement des molécules est censé obéir à la deuxième loi de Newton et au principe de conservation de l'énergie.

Maintenant, le mouvement des molécules n'est pas en général observable. L'expérience révèle, par contre, un ensemble  $\{q_i\}$  de, disons,  $n$  paramètres.

Selon Poincaré pour arriver à une "explication mécanique" du phénomène il faut connaître l'expression de l'énergie potentielle  $U$  du système (en fonction des  $\{q_i\}$ ) et l'expression de l'énergie cinétique  $T$  (en fonction des  $\{q_i\}$  et de leurs dérivées).

Les équations de Lagrange :

$$\frac{d}{dt} \frac{dT}{dq'_k} - \frac{dT}{dq_k} + \frac{dU}{dq_k} = 0 \quad , \quad (1)$$

fournissent alors, au cas où la théorie est valable, les lois révélées par l'expérience.<sup>17</sup>

La formulation Lagrangienne de la Mécanique est, en fait, mathématiquement équivalente à la formulation traditionnelle axée sur lois de Newton. Son avantage sur cette dernière est qu'elle permet d'écrire les équations de mouvement sans faire appel aux coordonnées des molécules du mécanisme sous-jacent mais uniquement aux observables.

Maintenant, pour avoir une "explication mécanique complète" d'un phénomène il faut non seulement arriver à des équations ayant la forme (1) qui soient compatibles avec les lois expérimentales, mais aussi donner les fonctions qui lient les  $3p$  coordonnées des  $p$  molécules, dont le système est supposé être composé, et les  $n$  paramètres  $\{q_i\}$ . Poincaré montre, cependant, que si l'on réussit à obtenir ces fonctions, il y aura toujours une infinité d'autres manières de lier les observables aux coordonnées d'un ensemble de molécules hypothétiques:

"Si donc un phénomène comporte une explication mécanique complète, il en comportera une infinité d'autres qui rendront également bien compte de toutes les particularités révélées par l'expérience".<sup>18</sup>

De cette "preuve" Poincaré tire deux conséquences: une de nature épistémologique et l'autre de nature historiographique.

S'il n'y a pas d'experimentum crucis qui puisse permettre de choisir entre deux explications mécaniques complètes, il faut abandonner "aux métaphysiciens", dit-il, la quête du "fond des choses", de la nature intime des phénomènes. Au physicien il ne resterait que la possibilité d'un choix fondé sur des critères "personnels", comme celui de "simplicité".

A l'épistémologie réaliste du "lecteur français" nous verrons que Poincaré va opposer une épistémologie instrumentaliste.

La thèse historiographique concerne le but que Maxwell aurait recherché avec ses théories de l'électricité et du magnétisme. L'usage par le savant écossais de la formulation Lagrangienne montre, selon Poincaré, qu'il ne cherchait pas à donner une explication mécanique complète des phénomènes électriques et magnétiques: "il se borne — affirme Poincaré — à démontrer que cette explication est possible".<sup>19</sup>

Poincaré signale, tout de même, que Maxwell avait essayé de donner une explication mécanique complète dans le mémoire PH, mais que "l'étrangeté et la complication des hypothèses qu'il avait été obligé de faire l'avaient amené ensuite à y renoncer".<sup>20</sup>

En particulier, Poincaré est convaincu que Maxwell n'a jamais considéré le déplacement électrique "comme un véritable mouvement d'une véritable matière".<sup>21</sup> La possibilité d'obtenir les mêmes résultats que la théorie du déplacement électrique de Maxwell en partant d'une théorie tout à fait différente — sa théorie des cellules — est pour lui une évidence indéniable des "vraies" intentions du savant écossais.

La critique de l'épistémologie du "lecteur français" et du jugement du Treatise qui en découle, va aussi comprendre les normes concernant la structure de la théorie physique. Poincaré utilise encore le

Treatise pour étayer ses thèses épistémologiques.

Poincaré prétend avoir démontré, dans le 4<sup>ème</sup> chapitre d'Electricité et Optique, que la théorie du déplacement électrique de Maxwell (qu'il transforme dans une "théorie du fluide inducteur") n'est pas compatible avec la théorie de l'état de contrainte du milieu diélectrique exposée dans le Treatise.

Le "lecteur français" ne trouverait donc pas non plus, dans le Treatise, la structure qu'il exige de la théorie physique:

"Le savant anglais ne cherche pas à construire un édifice unique, définitif et bien ordonné, il semble plutôt qu'il élève un grand nombre de constructions provisoires et indépendantes entre lesquelles les communications sont difficiles et quelquefois impossibles".<sup>22</sup>

La structure du Treatise traduit, selon Poincaré, la conception d'après laquelle le rôle de la théorie physique est essentiellement heuristique: "suggérer" des nouvelles expériences, ouvrir des voies nouvelles à la recherche théorique. A partir du moment où l'on abandonne toute épistémologie réaliste, où on laisse aux "métaphysiciens" la quête de la nature intime des phénomènes, on peut admettre plus de souplesse au niveau des exigences concernant la structure de la théorie physique:

"On ne doit donc pas se flatter d'éviter toute contradiction; mais il faut en prendre son parti. Deux théories contradictoires peuvent en effet, pourvu qu'on ne les mêle pas, et qu'on n'y cherche pas le fond des choses, être toutes deux d'utiles instruments de recherches, et peut-être la lecture de Maxwell serait-elle moins suggestive s'il ne nous avait pas ouvert tant de voies nouvelles divergentes".<sup>23</sup>

Cette thèse instrumentaliste de Poincaré sera à l'origine d'attaques passionnées de Duhem, comme nous aurons l'opportunité de considérer dans le prochain chapitre.

Nous voudrions mettre en relief, dans l'Introduction d'Electricité et Optique, deux thèmes principaux.

D'abord nous y décelons la caractérisation d'une épistémologie qui manifestement exerçait une grande influence sur la recherche en France et affectait la réception de théories appartenant à une autre tradition de recherches. Cette mise en évidence d'un système de valeurs ayant prévalu dans la communauté scientifique française — de toute évidence jusqu'à la date où Poincaré publie son ouvrage — demande d'être qualifiée à partir des évidences historiques qui nous sont disponibles.

Deuxièmement nous voyons se dessiner dans cette Introduction une nouvelle lecture du Treatise, rattachée à une épistémologie alternative que soutient Poincaré. Nous examinerons, dans quelle mesure cette lecture reflète le programme de Maxwell.

Nous avons des indications qui permettent de rendre crédible l'appréciation implicite chez Poincaré concernant l'existence, à l'intérieur de la communauté scientifique française de l'époque, d'un courant favorable à la quête d'explications mécaniques "complètes" des phénomènes physiques. A ce courant il faudrait associer une lecture mécaniste et réaliste du Treatise.

Certaines recherches de Mathieu et de Brillouin, que nous avons analysées dans le chapitre précédent, semblent se situer dans ce courant. En ce qui concerne Mathieu il serait, cependant, téméraire de le considérer comme un partisan des explications mécaniques des phénomènes physiques. Nous croyons, néanmoins, que sa tentative d'interpréter, dans une perspective mécaniste, la théorie du déplacement électrique est représentative d'une lecture du Treatise. Brillouin se rallie d'une façon plus explicite à un tel courant.

Nous avons aussi rapporté et commenté des propos de Potier qui relèvent d'une lecture mécaniste des théories de Maxwell.

### J. Bertrand et le "Lecteur Français"

Dans le chapitre II nous avons suggéré que J. Bertrand personni-

fié d'une façon exemplaire l'abstrait "lecteur français" dont nous parle Poincaré. Cette association n'est pas gratuite et nous avons, en appuie, son compte-rendu<sup>24</sup> de l'ouvrage Electricité et Optique, où il prend le parti de ce lecteur du Treatise.

L'introduction de Poincaré "soulève de graves questions" pour Bertrand :

"Qu'entend-il par un lecteur français? Pourquoi supposer qu'un Anglais ou un Allemand seraient moins choqués par le manque de rigueur? Deux siècles ont-ils suffi pour changer l'esprit des nations, et les descendants de Newton acceptent-ils aujourd'hui l'imagination en physique, pour laisser aux compatriotes de Descartes le respect de la rigueur et l'amour de la précision?"<sup>25</sup>

Ce passage se situe dans le contexte d'une critique au parti pris de Poincaré en faveur des "constructions provisoires et indépendantes" du Treatise. Nous avons déjà mis en évidence, dans le chapitre II, les critiques de Bertrand au manque de "rigueur" de l'ouvrage de Maxwell.

De la même façon que le "lecteur français", Bertrand va aussi considérer la théorie dynamique des circuits électriques du Treatise comme une "ombre fugitive et insaisissable", pour employer l'image de Poincaré. Une "explication mécanique" en termes des équations de Lagrange, comme "définit" ce dernier, n'est pas satisfaisante pour Bertrand. Elle abandonnerait toute recherche de la cause des phénomènes:

"...La définition exige vraiment trop peu. La recherche du lien qui rattache l'effet à la cause reste absolument en dehors du programme. La cause première demeurant inconnue, on peut espérer et on doit chercher(...) à découvrir au moins la cause immédiate (...). La connaissance de la fonction des forces ne dispenserait pas de poser la question".<sup>26</sup>

Bertrand s'en prend à "l'incuriosité" de Poincaré, à sa "modeste ambition" qui se limite à donner les fonctions T et U et vérifier si les lois du phénomène ont la forme des équations de Lagrange:

"Que diront les philosophes, qui, ne connaissant ni les équations de Lagrange ni les fonctions U et T, sont simplement

curieux de la nature? M. Poincaré s'en soucie fort peu ; ils sont trop présomptueux en voulant aborder de tels problèmes. Mais les géomètres eux-mêmes n'ont-ils pas le droit de demander, au delà des fonctions T et U, les propriétés du milieu qui transmet les forces et le mécanisme qui les produit?"<sup>27</sup>

La thèse de Poincaré sur le nombre infini de solutions possibles au problème de donner une "explication mécanique complète" d'un phénomène est révélatrice pour Bertrand, d'un ancien "doute" auquel on a souvent voulu "condamner le physicien". Il continue: "On ne doit s'étonner que de la résignation avec laquelle Poincaré renonce à jamais l'éclaircir".

Nous croyons que ces propos de J. Bertrand montrent que le "lecteur français" existait réellement, et qu'il y en avait, même, des représentants à l'intérieur de la communauté scientifique française de l'époque.<sup>28</sup>

J. Boussinesq et l'exigence Mécaniste vis-à-vis de la  
Théorie Electromagnétique de la Lumière

Nous voulons aussi faire une référence, quoique ponctuelle à l'intérieur de ce travail, à J. Boussinesq (1842-1929). Ce savant s'est distingué en France par ses recherches sur la théorie de l'élasticité et sur les théories éther-élastiques de la lumière. Il a peut être personnifié, mieux que quiconque, la permanence de l'idéal de l'explication mécanique des phénomènes physiques à l'intérieur de la communauté scientifique française. Nous le voyons en 1901 soutenir, au sujet de la théorie électromagnétique de la lumière, des propos qui rappellent ceux de W. Thomson :

"Je n'avais pas à parler de la théorie électromagnétique de la lumière, appartenant à un tout autre ordre d'idées ,

savoir, aux profondes tentatives, bien indécises encore, de Maxwell et de ses éminents disciples, pour synthétiser, même avant de les rendre nettement intelligibles, ou re-présentables, les phénomènes d'électricité et de magnétisme. Si cette théorie parvient à se dégager de ses obscurités, de ses contradictions même, tout au moins apparentes, elle ramènera vraisemblablement à l'optique de Fresnel, dont elle a les formules, c'est-à-dire au mécanisme des ondes lumineuses, les changements alternatifs d'état des milieux diélectriques, plutôt qu'elle ne réduira l'optique à oublier les mouvements vibratoires pour s'en tenir à d'aussi mystérieux changements d'état.

Sans doute, toutefois, la théorie des ondes lumineuses s'en trouvera finalement élargie. Mais on n'éclaircit pas obscurum per obscurius. Et, jusqu'ici, la Science, considérée sinon toujours dans ses matériaux, qu'il faut d'abord recueillir de toutes parts, du moins dans son organisation, dans sa partie édifiée ou susceptible de l'être, a grandi en allant d'Aristote à Descartes et à Newton, des idées de qualités où de changements d'état, qui ne se dessinent pas, à l'idée de formes ou de mouvements locaux, qui se dessinent ou se voient. Son progrès consiste à reculer peu à peu les limites du domaine qu'éclaire l'humble lumière, parfois bien vacillante, de notre raison et surtout de l'intuition géométrique (sa principale ressource), aux dépens des infinies régions obscures qui enserrant de toutes parts ce domaine de la clarté, et non à étendre jusque sur lui l'immense brouillard qui, malgré de vagues lueurs le perçant çà et là, dérobe à notre vision distincte tout le reste".<sup>29</sup>

Devant une telle profession de foi la réaction anti-mécaniste d'un Poincaré ou d'un Duhem prend tout son sens.

Il est cependant difficile de soutenir, sans risque d'amalgame dans l'état actuel de nos recherches, la continuité d'une certaine philosophie mécaniste en France pendant le XIX<sup>ème</sup> siècle, où tous ces savants auraient puisé leurs normes méthodologiques. Dans ce travail nous avons voulu contribuer à la caractérisation d'un tel courant, mais beaucoup de questions restent encore sans réponse.

Remarques sur la Lecture du Treatise par Poincaré

Le deuxième thème de l'Introduction de l'ouvrage de Poincaré dont nous voudrions faire quelques commentaires, concerne la lecture alternative qu'y est proposée du Treatise. Nous ne pouvons pas souscrire à certains traits de cette lecture. Il nous paraît indéniable — quoi qu'en dise Poincaré — que Maxwell n'a jamais abandonné le projet d'une explication mécanique complète de l'électricité et du magnétisme. La formulation Lagrangienne de la théorie de circuits électriques n'était considérée que comme une étape vers cette explication. Certains passages du Treatise ne laissent pas de doutes à ce sujet. Maxwell espérait en fait qu'une connaissance de la nature du courant électrique pourrait remplacer les analogies dynamiques par une théorie complète:

"A knowledge of these things would amount to at least the beginnings of a complete dynamical theory of electricity, in which we should regard electrical action, not, as in this treatise, as a phenomenon due to an unknown cause, subject only to the general laws of dynamics, but as the result of known motions of known portions of matter, in which not only the total effects and final results, but the whole intermediate mechanism and details of the motion, are taken as the objects of study".<sup>30</sup>

Notre interprétation n'est pas partagée, toutefois, par tous les historiens,<sup>31</sup>

Nous allons montrer également, dans la suite de ce travail, que les contradictions internes de l'électrostatique du Treatise, que soulève Poincaré, son dépendantes de son interprétation mécanique de la théorie du déplacement électrique et ne peuvent pas être directement imputées à cet ouvrage.

A partir de ces considérations nous croyons pouvoir soutenir que la lecture du Treatise qui entreprend Poincaré est compromise avec ses conceptions épistémologiques, et vise les étayer. Le Treatise a constitué pour Poincaré (et aussi pour Duhem, comme nous

verrons dans le prochain chapitre) un enjeu épistémologique majeur.

Cette conclusion n'enlève rien à l'importance historique de l'ouvrage de Poincaré pour la réception des théories de Maxwell.<sup>32</sup> Poincaré met effectivement en valeur ces théories, en neutralisant les critiques qui visaient la difficulté, voire l'impossibilité, de leur donner un fondement mécanique consistant. Il ré-évalue, également, les critiques qui visaient la cohérence des théories du Treatise. Avec Poincaré nous assistons à l'émergence d'une épistémologie instrumentaliste, étroitement associée à l'affirmation des théories de Maxwell en électricité et magnétisme.

SECTION V.2- LES INCONSISTANCES DE L'ELECTROSTATIQUE  
DU TREATISE SELON POINCARÉ

Nous avons mis en évidence chez Poincaré la dimension épistémologique de la thèse de l'existence de contradictions internes à l'électrostatique du Treatise. Les chapitres II et IV d'Electricité et Optique portent sur le développement de la question.

Nous tenons à les présenter ici car les contradictions que soulève Poincaré dépendent d'une interprétation mécanique qu'il propose pour la théorie du déplacement électrique de Maxwell. Ces développements n'ont pas de correspondance dans le Treatise, qui ne se prononce pas en faveur d'une interprétation mécanique particulière. La tentative de Poincaré a le mérite de montrer la difficulté des commentateurs de Maxwell à offrir un fondement mécanique consistant à ses théories. Nous avons déjà eu l'opportunité, dans le chapitre précédent, d'analyser deux de ces interprétations: celles de Mathieu et de Brillouin.

Poincaré considère, cependant, cette quête d'un fondement mécanique des théories électriques et magnétiques comme vaine. Le contenu de ces deux chapitres vise vraisemblablement rendre plus crédible cette thèse épistémologique. Poincaré prétend, également, montrer que la preuve de l'existence de théories incompatibles dans le Treatise ne saurait diminuer la valeur heuristique de cet ouvrage.

Nous voulons mettre en évidence dès le départ, combien Poincaré est redevable, dans ces chapitres, aux théories éther-élastiques de la lumière. Il va emprunter à ces dernières l'hypothèse d'une structure moléculaire de l'éther.<sup>33</sup>

L'ouvrage Théorie Mathématique de l'Electricité révèle d'ailleurs, explicitement, sa préoccupation au sujet du passage des théories traditionnelles en Optique à la théorie électromagnétique de la lumière. Il soulève, à cet égard, le rôle des hypothèses sur la structure de l'éther luminiphère;

"La théorie des ondulations — et ici Poincaré se réfère à la théorie de Fresnel — repose sur une hypothèse moléculaire; pour les uns, qui croient découvrir ainsi la cause sous la loi, c'est un avantage; pour les autres, c'est une raison de méfiance; mais cette méfiance me paraît aussi peu justifiée que l'illusion des premiers.

Ces hypothèses ne jouent qu'un rôle secondaire. J'aurais pu les sacrifier; je ne l'ai pas fait parce que l'exposition y aurait perdu en clarté, mais cette raison seule m'en a empêché.

En effet je n'emprunte aux hypothèses moléculaires que deux choses: le principe de la conservation de l'énergie et la forme linéaire des équations qui est la loi générale des petits mouvements, comme de toutes les petites variations.

C'est ce qui explique pourquoi la plupart des conclusions de Fresnel subsistent **sans** changement quand on adopte la théorie électro-magnétique de la lumière(...) J'ai cru de voir m'attacher d'abord à approfondir les idées de Fresnel; cela me paraissait la meilleure préparation à l'étude de la pensée de Clerk Maxwell".<sup>34</sup>

Il ne saurait donc pas avoir de doute sur le statut accordée par Poincaré à son interprétation mécanique de la théorie du déplacement électrique de Maxwell: elle ajoute en "clarté". L'hypothèse d'un éther ne serait que "commode" :

"Peu nous importe que l'éther existe réellement; c'est l'affaire des métaphysiciens; l'essentiel pour nous c'est que tout se passe comme s'il existait et que cette hypothèse est commode pour l'explication des phénomènes".<sup>35</sup>

Nous croyons donc pouvoir appliquer ces mêmes jugements au fluide de que Poincaré a inventé dans sa tentative d'interprétation mécanique des théories de Maxwell: le "fluide inducteur".

Toutefois, si Poincaré n'attribue pas une valeur ontologique à ces hypothèses, le fait est que par l'intermédiaire de son interprétation mécanique il atteindra deux buts :

- i) Montrer que l'électrostatique de Maxwell est inconsistante;
- ii) Appuyer sa thèse selon laquelle une théorie physique n'a pas pour objet de cerner la nature des phénomènes, mais simplement d'être un "instrument de recherche".

Nous croyons qu'avec les chapitres II et IV d'Electricité et Optique Poincaré vise, surtout, ces deux objectifs.

La Théorie du "Fluide Inducteur" de Poincaré

Le chapitre II d'Electricité et Optique consacré aux "Hypothèses de Maxwell", est fondé sur une distinction entre "fluide inducteur" et "électricité". On ne trouve pas chez Maxwell une correspondance quelconque de cette dualité de "fluides". Poincaré l'introduit, dit-il, pour des raisons de "clarté". D'après lui Maxwell utilise un même concept pour désigner deux "fluides" ayant des propriétés différentes :

"Maxwell suppose toute la matière des diélectriques occupée par un fluide élastique hypothétique, analogue à l'ETHER qui, en optique, est supposé remplir les corps transparents; il l'appelle ELECTRICITE. 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 ELECTRICITE sa signification habituelle"<sup>36</sup>

Poincaré signale d'ailleurs, en se référant au "fluide inducteur", que "le mot n'est pas dans l'ouvrage de ce physicien" mais que "la chose est là"; seulement "ce que nous avons appelé fluide inducteur [ Maxwell le désigne par ] le mot électricité".<sup>37</sup>

Le "déplacement électrique" est interprété, par la suite, comme le déplacement "d'une molécule du fluide inducteur (...) dérangée de sa position d'équilibre normal". Les composantes (f, g, h) du déplacement électrique désigneraient, alors, "des accroissements des coordonnées de la molécule".

Le milieu diélectrique serait donc dans cette conception, un milieu fluide, ayant une structure moléculaire. Poincaré admet alors "l'hypothèse de Maxwell", exprimée par les équations :

$$f = -\frac{K}{4\pi} \left( \frac{d\psi}{dx} \right), \quad g = -\frac{K}{4\pi} \left( \frac{d\psi}{dy} \right), \quad h = -\frac{K}{4\pi} \left( \frac{d\psi}{dz} \right), \quad (1)$$

où  $K$  est le pouvoir inducteur et  $\psi$  le potentiel électrostatique.

En partant de cette hypothèse, et en utilisant le théorème de Gauss pour le flux d'induction à travers une surface fermée, Poincaré obtient :

$$\frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = \rho$$

où  $\rho$  désigne la densité d'électricité libre dans un point. Si cette densité est nulle, il découle la condition d'incompressibilité du fluide inducteur :

$$\frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0$$

Cette incompressibilité du fluide inducteur serait, selon Poincaré liée à l'incompressibilité de l'électricité puisque "si l'électricité est en mouvement, le fluide inducteur y est aussi". Poincaré justifie ainsi cette proposition fondamentale :

"Si nous modifions les charges électriques des conducteurs placés à l'intérieur d'un diélectrique, nous faisons varier en même temps la valeur du potentiel en un point quelconque du diélectrique et par conséquent les valeurs  $f, g, h$  des composantes du déplacement électrique ..." <sup>38</sup>

Le potentiel  $\psi$  est associé donc, ici, à une certaine distribution d'ELECTRICITE dans les conducteurs.

Nous tenons à remarquer que cette signification de la grandeur  $\psi$  est la même que celle assignée par la théorie classique du potentiel, fondée sur l'hypothèse d'une action à distance. Plus loin Poincaré va interpréter différemment le potentiel électrostatique. Nous verrons aussi que le fait de ne pas figurer explicitement dans les équations (1) la grandeur "force électrostatique", à la place du gradient du potentiel, rentre dans la stratégie globale de Poincaré dans ce chapitre.

L'introduction du fluide inducteur constitue un des éléments "caractéristiques" de la théorie de Maxwell aux yeux de Poincaré, et reflète le rôle central accordé aux diélectriques dans les phénomènes élec-

trostatiques.

Un autre élément distinctif de cette théorie, selon Poincaré, se rapporterait à la "nature des courants". Si dans la "théorie ordinaire" on considère deux sortes de courants — ouverts et fermés — dans la théorie de Maxwell il ne saurait y avoir que des courants fermés. Tout mouvement non fermé du fluide électrique entraînerait un mouvement du fluide inducteur, comme il a montré plus haut :

"Il y a donc fermeture du courant à travers le diélectrique (...) suivant les lignes de force du diélectrique ..." ;

Resumons le raisonnement de Poincaré jusqu'ici. L'incompressibilité des deux fluides et la seule existence de courants fermés sont des conséquences, dans cette théorie, de la relation (1) de Maxwell entre le déplacement électrique et le gradient du potentiel, et des hypothèses supplémentaires introduites par Poincaré, à savoir :

- i) que le déplacement électrique est un déplacement d'une molécule du fluide inducteur;
- ii) que le potentiel  $\psi$  est lié à la distribution du fluide qu'il appelle Electricité.

La théorie du fluide inducteur conduit en particulier à cette conséquence des théories de Maxwell, à savoir, l'existence de deux types de courant: le courant de conduction (constitué par le mouvement de l'électricité) et le courant de déplacement (constitué par le mouvement du fluide inducteur). Poincaré signale que dans ces théories, à part des circuits ne comprenant que des courants de conduction, ou ceux comprenant les deux sortes de courant, il pourrait aussi exister des circuits comprenant uniquement des courants de déplacement, qui "joueront — dit-il — un rôle considérable dans l'explication des phénomènes lumineux".

Les courants de déplacement n'auraient cependant pas toutes les propriétés des courants de conduction :

"Les courants de conduction étant ceux qui se produisent dans les circuits bons conducteurs ils doivent nécessairement obéir, pour être d'accord avec l'expérience, aux lois

de Ohm, de Joule, à celle d'Ampère sur les actions mutuelles de deux éléments de courants et aux lois de l'induction. Quant'aux courants de déplacement nous ne savons rien sur les lois auxquelles ils obéissent; le champ est donc ouvert aux hypothèses. Maxwell admet qu'ils obéissent à la loi d'Ampère et aux lois de l'induction, mais que les lois de Ohm et de Joule ne leur sont pas applicables, ces courants ne rencontrant à leur établissement d'autre résistance que celle qui résulte de l'élasticité du fluide inducteur, résistance de nature tout à fait différente de celle de la résistance des conducteurs".<sup>39</sup>

### L'Elasticité du "Fluide Inducteur"

Jusqu'ici, sans que Poincaré le dise explicitement, la théorie du fluide inducteur était fondée sur l'hypothèse d'une action à distance de la distribution d'électricité sur les molécules du fluide inducteur. Nous avons signalé, plus haut, que les équations (1) — malgré qu'il y figurèrent les composantes du déplacement électrique — dépendaient d'une interprétation traditionnelle du potentiel électrostatique  $\psi$ , qui suppose cette action à distance.

Poincaré va ensuite introduire la conception de l'action électrostatique se transmettant de proche en proche, par l'attribution d'une nouvelle propriété au fluide inducteur: celle d'élasticité. Dans un deuxième moment le potentiel électrostatique va recevoir une interprétation mécanique compatible avec cette conception.

La propriété d'élasticité du fluide inducteur va être introduite comme une conséquence de l'hypothèse de Maxwell concernant la localisation de l'énergie électrostatique :

"Dans la théorie ordinaire cette énergie potentielle est due aux travaux des attractions et des répulsions qui s'exercent entre les différentes masses électriques du système; dans la théorie de Maxwell, elle est due à l'élasticité du fluide inducteur qui est dérangé de sa position d'équilibre normal".<sup>40</sup>

Dans la théorie ordinaire l'expression de l'énergie potentielle est obtenue par le calcul du travail virtuel réalisé par les forces électriques (agissantes à distance) sur l'électricité libre répandue dans une région de l'espace. Poincaré montre qu'on peut exprimer ce travail — moyennant certaines transformations mathématiques — par une intégrale de volume sur tout l'espace :

$$W = \int \frac{K}{8\pi} \sum \left( \frac{d\psi}{dx} \right)^2 d\tau, \quad (2)$$

où  $K$  est le pouvoir inducteur spécifique du milieu.

Comme  $\psi$  est constant dans les conducteurs (ce qui entraîne pour ces points la nullité des dérivées du potentiel), le calcul de cette intégrale peut se limiter aux régions occupées par des diélectriques.

Poincaré introduit ensuite les relations (1) pour obtenir cette énergie en fonction de la grandeur "déplacement électrique" :

$$W = \int \frac{2\pi}{K} (f^2 + g^2 + h^2) d\tau. \quad (3)$$

Cette expression, Maxwell l'obtient dans le Treatise (§100c) à peu près de la même façon que Poincaré.<sup>41</sup> Celui-ci se propose, cependant, à faire le "pas suivant" dont Maxwell s'est dit incapable, et obtenir "l'expression de cette énergie considérée comme résultat de la déformation du fluide inducteur". Poincaré va, alors, donner une interprétation mécanique de cette énergie.<sup>42</sup>

Dans ce but le fluide inducteur est supposé être dans un état d'équilibre contraint, en raison de la présence de corps conducteurs électrisés.

Soient  $X, Y, Z$  les forces par unité de volume qui agissent sur un élément de volume  $d\tau$  de ce fluide.

Si les "molécules électriques" du système subissent un déplacement infinitésimal, cela va entraîner des variations sur les composantes ( $f, g, h$ ) du déplacement électrique. Le travail virtuel réalisé par les forces qui agissent sur  $d\tau$  sera,

$$(X\delta f + Y\delta g + Z\delta h) d\tau.$$

Une intégration permet d'obtenir le travail réalisé par ces forces pour l'ensemble du milieu.

La variation de l'énergie potentielle du système, associée à ce travail, est :

$$\delta W = - \int (X \delta f + Y \delta g + Z \delta h) dx, \quad (4)$$

où l'intégrale s'étend sur tout le volume du diélectrique.

Si l'on calcule maintenant la variation  $\delta W$  à partir de l'expression (3) il vient :

$$\delta W = \int \frac{4\pi}{K} (f \delta f + g \delta g + h \delta h) dx. \quad (5)$$

Comme ces deux expressions doivent être égales, on obtient :

$$X = -\frac{4\pi}{K} f, \quad Y = -\frac{4\pi}{K} g, \quad Z = -\frac{4\pi}{K} h. \quad (6)$$

Nous devons souligner que ces deux expositions de  $\delta W$  correspondent à deux conceptions distinctes du siège de l'énergie électrostatique. L'équation (3) avait été obtenue — nous le rappelons — en supposant que l'énergie potentielle du système était due aux interactions à distance entre les "molécules électriques". Le fait d'introduire les "notations de Maxwell", c'est à dire les relations (1), ne change pas, en soi, la signification physique de l'expression, et ne relève que d'une transformation mathématique.

Il n'en va pas de même de l'expression (4) qui suppose l'existence d'un milieu doué d'élasticité. L'énergie potentielle est maintenant l'énergie due aux déformations du milieu et ayant celui-ci par siège.

Poincaré commente les relations (6):

"Ces relations nous montrent que les composantes de la force qui s'exerce sur un élément  $d\tau$  du fluide inducteur sont proportionnelles aux composantes du déplacement électrique. La force élastique du fluide inducteur est donc dirigée suivant le déplacement et le rapport de sa grandeur à celle du déplacement est égal à  $\frac{4\pi}{K}$  "43

Ce résultat est extrêmement important. Il exprime le fait que, pour le fluide inducteur, le déplacement d'une molécule entraîne des forces élastiques proportionnelles à ces déplacements. Cette conséquence

dépend des équations (1), mais n'y était pas contenue, puisqu'aucune élasticité n'était alors attribuée au fluide inducteur.

Poincaré montre, toutefois, combien l'interprétation physique de ces résultats est problématique. Il faudrait ainsi supposer que l'élasticité du fluide inducteur, contrairement à l'élasticité de l'éther lumineux, dépend de la position absolue des molécules du fluide :

"On ne conçoit pas comment le point mathématique où se trouve une molécule du fluide inducteur en équilibre normal, pourra agir sur cette molécule pour la ramener à sa position d'équilibre quand une cause électrique l'en aura déplacée. On concevrait plus facilement que ce sont les molécules matérielles du diélectrique qui agissent sur les molécules du fluide inducteur pénétrant le milieu pondérable. Mais cette hypothèse ne léverait pas toutes les difficultés, car elle n'expliquerait pas l'élasticité du fluide inducteur répandue dans le vide. En outre l'action de la matière sur le fluide inducteur entraînerait l'existence d'une réaction de ce fluide sur la matière. Or, on n'a constaté aucune manifestation de cette réaction".<sup>44</sup>

Ce commentaire de Poincaré dénonce plutôt les limites de son hypothèse mécanique. Maxwell — nous insistons sur ce point — n'a pas essayé de donner une explication de l'état de contrainte du milieu dans le Treatise. Il l'a fait, cependant, dans le mémoire PH. Mais les objections que Poincaré soulève, dans le passage ci-dessus, ne s'appliquent pas au milieu électromagnétique comme il était conçu dans ce mémoire. Ce milieu avait une structure plus complexe que celle du "fluide inducteur" de Poincaré: il était composé par des particules (qui jouaient le rôle de l'électricité) et par des cellules élastiques. La force élastique qui tend à ramener la particule à sa place d'avant le déplacement, était une force appliquée par les parois des cellules sur les particules.

Poincaré fait allusion à un milieu ayant une structure semblable, mais le critère de simplicité l'empêche de l'adopter :

"On pourrait encore supposer l'existence de deux fluides inducteurs se pénétrant et dont les molécules de l'un agiraient

sur les molécules de l'autre dès qu'elles seraient dérangées de leurs positions d'équilibre normal. Mais si cette hypothèse a l'avantage de ramener l'élasticité spéciale au fluide inducteur à l'élasticité telle qu'on la conçoit ordinairement, elle a l'inconvénient d'être plus compliquée que celle de l'existence d'un seul fluide".

Ces objections, l'une de nature physique, l'autre de nature méthodologique, conduisent Poincaré à conclure que l'hypothèse du fluide inducteur "n'est que provisoire" et "sera remplacée par une autre plus logique dès que les progrès de la science le permettront".<sup>45</sup>

Malgré les problèmes que pose sa théorie, Poincaré insiste sur le fait qu'il faut distinguer deux fluides chez Maxwell. Ce dernier aurait employé le même mot "électricité" pour désigner deux fluides ayant des propriétés différentes : "... l'électricité des diélectriques est supposée élastique, tandis que l'électricité des conducteurs est supposée inerte. Ces propriétés différentes attribuées à deux fluides désignés par le même nom sont la cause du manque de clarté que présentent certains passages de l'ouvrage de Maxwell".<sup>45</sup>

L'Interprétation Mécanique de la Grandeur  
"Potentiel Electrostatique"

Poincaré va montrer, finalement, que si l'on accepte, malgré tout, la théorie du fluide inducteur, elle est capable, par l'adjonction de nouvelles hypothèses, d'associer les forces élastiques au potentiel électrostatique et donc intégrer les équations (1) dans cette théorie mécanique (et les dissocier de l'hypothèse d'action à distance qui y était implicitement adoptée).

Avant d'introduire les hypothèses qui vont permettre d'interpréter la grandeur  $\Psi$ , il souligne qu'elles doivent, nécessairement, être compatibles avec les "lois expérimentales".

Ces "lois" comprennent la condition que doit vérifier le potentiel  $\Psi$  en un point d'un diélectrique :

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{d\psi}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( k \frac{d\psi}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left( k \frac{d\psi}{dz} \right) = 0 \quad (5)$$

et en un point d'un conducteur :

$$\psi = \text{constante} .$$

La fonction  $\psi$  doit finalement être continue quand on passe d'un diélectrique à un conducteur (ses dérivées ne sont cependant pas continues s'il y a une distribution d'électricité sur la surface du conducteur).

Poincaré introduit alors l'hypothèse selon laquelle on peut appliquer au fluide électrique et au fluide inducteur les lois de l'hydrostatique.<sup>46</sup>

Il interprète alors  $\psi$  comme la "pression en un point du fluide inducteur". L'hydrostatique permet d'écrire les composantes de la force élastique (X, Y, Z) comme des dérivées de la pression :

$$X = \frac{d\psi}{dx} , \quad Y = \frac{d\psi}{dy} , \quad Z = \frac{d\psi}{dz} .$$

Mais Poincaré avait déjà obtenu, pour ces composantes, les équations (6). La comparaison de ces deux équations permet finalement d'arriver aux équations (1) :

$$f = -\frac{k}{4\pi} \frac{d\psi}{dx} , \quad g = -\frac{k}{4\pi} \frac{d\psi}{dy} , \quad h = -\frac{k}{4\pi} \frac{d\psi}{dz}$$

"Ces nouvelles relations sont précisément celles qui définissent les composantes du déplacement,  $\psi$  désignant alors le potentiel. Pour justifier la manière dont nous avons défini, d'après Maxwell, les composantes du déplacement électrique, il nous faut montrer que la pression  $\psi$  en un point du fluide inducteur n'est autre chose que le potentiel".

Il faut, en d'autres termes, retrouver les "lois expérimentales" énumérées plus haut. Poincaré montre que la condition d'incompressibilité du fluide inducteur :

$$\frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0$$

conduit à l'expression (5) valable pour les diélectriques. Donc  $\psi$  inter-

prété en tant que pression du fluide inducteur, satisfait à la première condition pour le potentiel.

La grandeur  $\Psi$  est aussi constante à l'intérieur des conducteurs, "car l'électricité qui remplit les conducteurs n'est pas élastique, par conséquent  $X, Y, Z$ , sont nuls et il doit en être de même des dérivées de  $\Psi$ ".

Poincaré montre ensuite que cette grandeur satisfait à la condition de continuité quand on passe des diélectriques aux conducteurs :

"En effet, si la pression n'était pas la même des deux côtés de la surface qui limite le conducteur, l'équilibre n'existerait pas, puisque le fluide électrique étant inerte, toute différence de pression aurait pour effet de faire mouvoir ce fluide".

Poincaré conclut alors que "la pression du fluide inducteur en un point est précisément le potentiel en ce point".<sup>47</sup>

Avec ce résultat, la théorie du fluide inducteur s'accorde avec la conception selon laquelle les actions électrostatiques se transmettent de proche en proche. Il reste, cependant, le problème que soulève Poincaré en rapport avec la propriété d'élasticité du fluide inducteur. Sa théorie, comme remarquera FitzGerald, est à cet égard assez étrange, puisqu'elle suppose l'existence d'un fluide qui est, en même temps, incompressible et élastique.

L'interprétation du potentiel électrostatique comme la pression des deux fluides ne pourra cependant pas s'accorder avec la théorie de Maxwell de l'état de contrainte du milieu, comme Poincaré le montrera par la suite.

Poincaré et l'Incompatibilité chez Maxwell de la Théorie du  
Déplacement Electrique et de la Théorie de l'Etat de  
Contrainte du Milieu

Dans le chapitre IV d'Electricité et Optique Poincaré développe la théorie de Maxwell qui attribue à l'action contigüe d'un milieu en état de contrainte l'action mécanique observée entre des conducteurs<sup>48</sup> électrisés. Poincaré va démontrer, particulièrement, que cette théorie est incompatible avec la théorie du fluide inducteur et il va porter ce même jugement à la théorie du déplacement électrique.

Poincaré avertit le lecteur qu'une théorie de l'action mécanique entre des corps électrisés peut être élaborée sans aborder les questions sur la façon dont se transmet cette action, ou la nature de l'électricité et de son interaction avec la matière.

Cela étant, il rappelle, toutefois, la particularité de l'approche de Maxwell, qui suppose que l'action se transmet de façon contigüe par l'intermédiaire d'un milieu.

Poincaré considère, d'abord, une hypothèse parmi d'autres, qui traduit l'exigence d'une action contigüe :

"L'hypothèse la plus simple et la plus naturelle que l'on puisse faire pour expliquer les attractions et répulsions entre conducteurs électrisés est d'attribuer ces actions à l'élasticité du fluide répandu entre les conducteurs et de chercher à appliquer à ce fluide les principes ordinaires de la théorie de l'élasticité".

Il montre, cependant, que cette hypothèse conduirait à des conséquences non conformes à l'évidence expérimentale :

"En effet, dans un fluide élastique les forces élastiques résultant de déplacements très petits sont des fonctions linéaires de ces déplacements. Par conséquent l'hypothèse dans laquelle nous nous sommes placés conduirait à admettre que la force qui s'exerce entre deux conducteurs électrisés est une fonction linéaire des charges électriques des conducteurs. Il

en résulterait qu'en doublant les charges de chaque conducteur on devrait avoir une force double; or, on sait que si les charges de deux conducteurs viennent à être doublées la force qui s'exerce entre eux est quadruplée".<sup>49</sup>

Parmi les hypothèses qui peuvent s'accorder avec l'expérience figure celle développée par Maxwell. La théorie de Maxwell aurait l'avantage, selon Poincaré, de supposer des hypothèses moins "compliquées" que d'autres théories d'action contigüe.

Il expose alors les solutions obtenues par Maxwell dans le chapitre V, vol. I, du Treatise, qui rendent compte de l'action mécanique entre des systèmes électrisés par l'action contigüe d'un milieu qui présente une certaine distribution de pressions et tensions dans son intérieur. Poincaré signale que les solutions données par Maxwell ne sont pas les seules à satisfaire les équations, mais qu'il y a un "nombre infini de solutions" possibles.<sup>50</sup>

La solution proposée par Maxwell implique l'existence d'une tension dans la direction des lignes de force, et d'une pression dans les directions perpendiculaires. Les tensions et pressions ont la même valeur absolue  $\frac{KR^2}{8\pi}$ , où  $R$  est la force électromotrice.

Selon Poincaré la solution proposée par Maxwell poserait un certain nombre de problèmes, malgré le fait qu'elle s'accorde avec l'expérience :

"... il faudra supposer en même temps que les lois de l'élasticité de ce fluide diffèrent absolument des lois de l'élasticité des corps matériels que nous connaissons, des lois de l'élasticité admises pour l'éther luminifère, qu'elles diffèrent enfin des lois que nous avons été conduits à admettre pour l'élasticité du fluide inducteur".<sup>51</sup>

Il y aurait d'abord une incompatibilité avec la relation entre déplacement et force élastique valable pour l'éther luminifère et pour ce que Poincaré a appelé le "fluide inducteur" :

"Pour ces deux fluides hypothétiques en effet, comme pour les fluides pondérables eux-mêmes, les forces élastiques sont

proportionnelles aux déplacements qui les produisent, et il en serait de même des variations de pressions dues à l'action de ces forces. La pression, quelles que soient d'ailleurs les hypothèses complémentaires que l'on fasse, devrait donc s'exprimer linéairement à l'aide du potentiel et de ses dérivées. Au contraire nous venons d'être conduits à des valeurs de la pression qui sont du 2<sup>ème</sup> degré par rapport aux dérivées du potentiel".<sup>52</sup>

Ces objections ne sauraient cependant pas être vraiment graves, affirme Poincaré, qui se montre disposé, à la limite, à attribuer "ces propriétés paradoxales au fluide hypothétique qui remplit les diélectriques". Mais l'interprétation physique de la fonction  $\Psi$  n'est pas la même dans cette théorie et dans celle du fluide inducteur, que Poincaré a développé, et qu'il attribue aussi à Maxwell :

"Il est évident que la conciliation entre ces deux théories est impossible; car nous avons été conduits à attribuer au fluide inducteur une pression égale à  $\Psi$  ; au contraire dans la théorie nouvelle la pression du fluide qui remplit les diélectriques a une valeur toute différente".

Comme nous avons signalé plus haut, la valeur de cette pression selon la théorie de Maxwell n'est pas effectivement, égale au potentiel, mais proportionnelle au carré du gradient du potentiel. En plus, le milieu supposé par Maxwell présente non seulement une pression de type hydrostatique égale dans toutes les directions mais aussi, superposée à cette dernière, une tension dans la direction des lignes de force.

Néanmoins, l'épistémologie de Poincaré attribue un objet aux théories physiques qui rend tolérable ce type de contradiction interne :

"Il ne faut pas attribuer à cette contradiction trop d'importance. J'ai exposé plus haut en effet les raisons qui me font penser que Maxwell ne regardait la théorie du déplacement électrique ou du fluide inducteur que comme provisoire, et que ce fluide inducteur auquel il conservait le nom d'électricité, n'avait pas à ses yeux plus de réalité objective que les deux fluides de Coulomb".<sup>52</sup>

Un problème plus grave aux yeux de Poincaré est l'incompatibilité entre la théorie précédente et l'idée de Maxwell selon laquelle l'éner-

gie localisée dans le diélectrique est, elle, entièrement potentielle. L'énergie contenue dans un volume  $d\tau$  d'un milieu est donnée, selon Maxwell, par :

$$2\pi(f^2 + g^2 + h^2) d\tau = \frac{R^2}{8\pi} d\tau$$

où l'on a supposé  $K=1$ .

Poincaré calcule la variation de l'énergie contenue dans cet élément de volume, dans l'hypothèse qu'elle est due au travail des efforts sur la surface qui limite cet élément quand on le déforme (il considère le cas simple d'un parallélépipède qui subit des élongations  $d\varepsilon_1$ ,  $d\varepsilon_2$ ,  $d\varepsilon_3$  dans chacune de ses arêtes, et où l'une de celles-ci est disposée parallèlement à la direction de  $R$ ). En utilisant les expressions des efforts dans le milieu, données par Maxwell, le travail total réalisé par ceux-ci pour produire les élongations sera :

$$\frac{R^2}{8\pi} d\tau (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)$$

Ce travail doit être égal à la variation de l'énergie potentielle contenue dans l'élément  $d\tau$  :

$$dW = \frac{2RdR}{8\pi} d\tau .$$

Il découle de l'égalité de ces deux expressions que :

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 = 2 \log R + \text{cte} .$$

A l'état d'équilibre (où  $R=0$ ),  $\varepsilon_2$  ou  $\varepsilon_3$  devraient alors prendre des valeurs infinies, une conséquence absurde.

Poincaré conclut donc que si l'on accepte la théorie de l'élasticité du milieu diélectrique proposée par Maxwell, on ne pourra pas admettre, comme le savant écossais,

"... l'hypothèse fondamentale de la localisation de l'énergie dans le diélectrique, si l'on regarde cette énergie comme potentielle".

Poincaré signale que Maxwell lui-même se refuserait à accepter, dans le cadre de l'électrostatique, qu'une partie de l'énergie puisse être

cinétique, ce qui pourrait éliminer — dit-il — cette difficulté.

Comme conclusion de ce chapitre, Poincaré considère (...)

"... avoir prouvé que la théorie précédente, parfaitement acceptable en elle-même ne rentre pas dans le cadre général des idées de Maxwell".<sup>53</sup>

Nous allons analyser par la suite la légitimité de cette thèse.

Des Eléments en vue d'une Appréciation de la Critique de  
l'Electrostatique du Treatise par Poincaré

Nous avons mis en évidence que la théorie du fluide inducteur de l'ouvrage Electricité et Optique constitue une interprétation mécanique de la théorie du déplacement électrique qui est étrangère à l'esprit du Treatise.

Dans son compte-rendu de l'ouvrage de Poincaré, Gray semble soutenir la même thèse :

"Maxwell's electric displacement and electric force remain simply analogues to the strain and stress in an elastic solid and it can hardly be said that anyone has yet brought them out of the category of abstractions. No doubt the mechanical analogues suggested by Maxwell himself and by others are helpful in fixing the ideas and enabling the mind to form some concrete conception of what takes place in the medium; but they may easily be carried too far, and prove the means of leading to error. It is almost better in some respects to remain content, if possible, with abstractions, until further light as to the properties of the ether is obtained by experiment and observation; and perhaps it is on this account that Maxwell has abstained from giving such illustrations in his treatise".<sup>54</sup>

Gray, cependant, n'analyse pas la théorie du fluide inducteur, et se limite à reprendre l'opinion de Poincaré selon laquelle la distinction des deux fluids "avoids some difficulties of explanation and treat -

ment" à l'intérieur du Treatise.

Nous sommes d'accord avec Gray pour dire que dans le Treatise Maxwell reste au niveau de l'analogie entre le déplacement électrique et le déplacement d'un corps élastique,<sup>55</sup> et ne propose aucune explication de la proportionalité entre le déplacement électrique et la force électrique.

FitzGerald, dans un autre compte-rendu de l'ouvrage Electricité et Optique, est beaucoup plus critique à l'égard de Poincaré.<sup>56</sup> Tout en affirmant que la théorie du fluide inducteur proposée par ce savant n'est pas inconsistante avec la théorie du déplacement électrique, il souligne que "Maxwell says distinctly that he does not know what the change of structure is like which he calls electric displacement".<sup>57</sup>

FitzGerald croit, cependant, que l'idée même d'un fluide (le fluide inducteur) qui soit au même temps incompressible et élastique est difficilement acceptable, même avec la remarque de Poincaré que cette élasticité est différente de celle des corps matériels :

"There must be something besides the fluid; there must be some structure fixed in space which offers an elastic reaction to the fluid when driven past it, or else there must be the two liquids he objects to that are driven past one another. It is hardly a fair representation to talk of an elastic incompressible fluid, and then to invent difficulties when the phenomena could not confessedly be represented by any such thing, but only by a fluid with some other mechanism superadded".<sup>58</sup>

FitzGerald n'est sûrement pas sensible, ici, à ce que nous considérons être la "vraie pensée" de Poincaré.... Il nous semble que ce dernier, en proposant l'hypothèse d'un "fluide inducteur", voulait en réalité montrer les limitations de toute explication mécanique des phénomènes électriques et magnétiques. D'autre part, la mise en évidence des "contradictions" de l'électrostatique du Treatise vient en appui de ses conceptions concernant l'objet des théories physiques.

FitzGerald a toutefois raison, de son point de vue, de critiquer Poincaré, étant donné la thèse de ce dernier selon laquelle la théorie du fluide inducteur — qu'il ne cesse d'attribuer à Maxwell — ne peut pas

expliquer l'interaction électrostatique dans une approche d'action médiatisée et contigüe. FitzGerald soutient que Poincaré ne prouve, avec son raisonnement, que l'inadéquation de ses propres hypothèses :

"Maxwell long ago pointed out that no linear system of stress could leave a medium in equilibrium and move bodies immersed in it; and yet M. Poincaré criticises Faraday's system because it is not linear; and this after remarking himself that the elasticity postulated already was not a bit like that of matter. All that is necessary is some assumption as to the connexion between the conducting matter and the dielectric, for the "fluide inducteur" by hypothesis has elastic properties that make it the seat of the right amount of potential energy and all that can possibly be necessary is to connect the matter with it in such a way that the energy of the medium lost when the conductor moves is given up to the conductor. M. Poincaré has again omitted to remember that the peculiar elasticity of the "fluide inducteur" necessitates some structure with which it is connected, and the Faraday stress may be in this structure, and due to its connexion with the "fluide inducteur", and not at all due to another fluid with peculiar properties".<sup>59</sup>

Nous nous sommes permis de citer ce long extrait parce qu'il est révélateur de ce qui oppose FitzGerald à Poincaré. Ici deux conceptions différentes s'affrontent sur la nature des explications mécaniques et, probablement aussi, sur l'objet d'une théorie physique.

FitzGerald avait ainsi proposé, en 1885, un modèle pour l'éther ayant deux composantes : des roues fixes qui jouaient le même rôle que les vortex de Maxwell dans le mémoire PH — et des bandes élastiques qui assuraient le lien entre les roues. Celles-ci étaient des analogues de la force magnétique, tandis que la déformation des bandes était censée imiter la polarisation diélectrique, et que leur glissement sur les roues représentait un courant électrique. Ce modèle arrivait à rendre compte, particulièrement, de la propagation de perturbations analogues à celle de la lumière.<sup>60</sup>

Quand FitzGerald parle d'une "structure" du milieu, il pense à ce type de modèle, qui pose un certain assemblage de composants différents reliés d'une certaine façon. Le modèle proposé par Maxwell dans le mémoire PH et toute une série d'autres, proposés notamment par O. Lodge et W.

Thomson sont inclus dans cette catégorie de modèles mécaniques.

Poincaré refuserait ces tentatives, non seulement parce qu'il considère que la théorie physique n'est pas censée prescrire la nature de l'éther (et là-dessus nous croyons que les auteurs de ces modèles n'auraient pas soutenu, non plus, qu'ils correspondent à une quelconque "réalité objective") mais surtout à cause de leur manque de "simplicité". Des nombreuses fois Poincaré rejette des hypothèses sur la base de ce critère.

L'hypothèse d'un éther ayant une structure moléculaire était par contre considérée comme "simple". Poincaré prenait, en plus, comme référence les théories ether-élastiques de la lumière, qui souvent se fondaient sur une hypothèse semblable. Certainement il cherchait un "compromis" entre ces théories traditionnelles de l'Optique et la nouvelle théorie électromagnétique de la lumière, ce qui conduisait naturellement à appliquer à celle-ci les hypothèses supposées par les premières, ne serait-ce que pour satisfaire aux besoins du "lecteur français"). Les attaques virulents de P. Duhem aux explications de "l'école anglaise" témoignent, ainsi, de la résistance en France à accepter les modèles mécaniques d'un FitzGerald ou d'un Lodge.

La position de Poincaré ne peut être plus claire que dans le passage suivant de l'ouvrage Théorie Mathématique de la Lumière :

"Peu nous importe que l'éther existe réellement; c'est l'affaire des métaphysiciens; l'essentiel pour nous c'est que tout se passe comme s'il existait et que cette hypothèse est commode pour l'explication des phénomènes. Après tout, avons nous d'autre raison de croire à l'existence des objets matériels? Ce n'est là aussi qu'une hypothèse commode, seulement elle ne cessera jamais de l'être, tandis qu'un jour viendra sans doute où l'éther sera rejeté comme inutile".<sup>61</sup>

La structure moléculaire qu'il adopte pour l'éther en Optique, et pour le fluide inducteur en Electrostatique, ne ferait que légitimer l'application du principe de la conservation de l'énergie et l'hypothèse de la linearité des équations des petits mouvements de ces fluides. Cette hypothèse de base permettrait également d'expliquer comment la théorie électromagnétique de la lumière arrive aux mêmes "résultats analytiques" des théories ether-élastiques de la lumière.<sup>62</sup>

FitzGerald, qui dans son Compte-Rendu analyse la théorie du fluide inducteur en physicien et probablement n'est pas concerné par l'usage épistémologique qui fait Poincaré des théories de Maxwell, ne peut pas accepter cette "hypothèse moléculaire". Il rejette, sur cette base, l'autre objection que fait Poincaré à la théorie des tensions et pressions dans le milieu électromagnétique, concernant l'impossibilité de rendre compatible cette théorie avec l'hypothèse d'une énergie électrostatique ayant une forme uniquement potentielle. Cette difficulté est — affirme FitzGerald — créée par Poincaré,

"... by assuming that the energy of the medium is all due to the work done by these mechanical stresses deforming it. This is a most gratuitous assumption. Take the case of the stretched string with the weight on it. The increased energy of the system is not due only to the work done by the INCREASED tension..."

En se référant à l'observation de Poincaré sur la nature potentielle de l'énergie électrostatique chez Maxwell, et sur la nature cinétique de l'énergie électrodynamique, FitzGerald soutient, ironiquement, que ce n'est là qu'un faux problème :

"Has M. Poincaré forgotten that potential energy may in any case be the kinetic energy of an associated system ? or can he not imagine two modes of motion of the same medium ? Anyway, if the potential energy may be the kinetic energy of an associated system, and if M. Poincaré's difficulties are inapplicable to a kinetic explanation of the phenomena, it seems impossible but that they are really inapplicable to a potential system if this system be judiciously devised. It is just here that M. Poincaré fails. He revels in elastic fluids, and yet he continually harps upon the same difficulty — namely, "How can an incompressible liquid be elastic at all ?" — and instead of once for all solving this by acknowledging that there must be some structure, he reverts to it as if it were a new difficulty whenever he comes across its consequences"<sup>63</sup>

L'éther gyrostatique conçu par W. Thomson est un exemple d'un milieu où toute l'énergie qu'y réside est dans une forme cinétique. Le milieu conçu par Maxwell dans le mémoire PH peut accumuler l'énergie sous

ces deux formes, et il y a un échange entre ces deux formes d'énergie pour expliquer certains des phénomènes qui ont lieu dans le "champ". Poincaré refusait probablement ces modèles à cause de leur "complexité", mais de cette façon il rendait impossible toute recherche fructueuse d'une théorie mécanique du champ électromagnétique.

Brillouin, dans un autre Compte-Rendu de l'ouvrage de Poincaré, donne dans une certaine mesure légitimité à la thèse de FitzGerald selon laquelle Poincaré s'est servi d'une interprétation mécaniquement inadéquate des théories de Maxwell :

"... M. Poincaré montre qu'il est impossible d'imaginer un milieu servant à transmettre par des actions élastiques des forces en raison inverse du carré de la distance. C'est la conclusion à laquelle j'étais arrivé un an plutôt<sup>64</sup> (...). Faut-il conclure donc qu'il est impossible de représenter ces actions par l'intermédiaire d'un milieu élastique ? Non, mais seulement que le problème a été incomplètement posé (...). D'ailleurs les difficultés que l'on rencontre dans la théorie de Maxwell pour l'Electrostatique et que je m'efforcerai de mettre en évidence plus loin, me portent à attribuer de plus en plus d'importance aux essais même incomplets de théorie mécanique de l'électricité".<sup>65</sup>

Nous croyons voir dans les considérations de FitzGerald et de Brillouin que Poincaré visait, avec les chapitres II et IV de son ouvrage Electricité et Optique, moins le but de fournir une explication mécanique consistante de l'électrostatique du Treatise — ce qui l'aurait empêché de présenter la théorie du fluide inducteur comme une tentative valable dans ce sens — mais plutôt le but de discréditer ce genre d'explication, aussi bien que de neutraliser, au même temps, un certain type d'objection à l'ouvrage de Maxwell.

Nous allons retrouver encore cette toile de fond épistémologique dans la comparaison qui va entreprendre Poincaré de la théorie du déplacement électrique avec la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti.

SECTION V.3- LA COMPARAISON ENTRE LES THEORIES DES MILIEUX  
DIELECTRIQUES DE POISSON-MOSSOTTI ET DE  
MAXWELL

Plusieurs savants français ont critiqué l'absence d'une théorie satisfaisante des milieux diélectriques chez Maxwell. Cet aspect de la réception des théories du savant écossais est assez paradoxal, vue la place centrale qu'il accorde à ces milieux.

Néanmoins, la plupart des sources françaises que nous avons analysées exposent l'électrostatique de Maxwell parallèlement à la théorie de Poisson-Mossotti des diélectriques. Jusqu'à ce que Mathieu démontre l'incompatibilité entre cette dernière théorie et la théorie du déplacement électrique, on avait cru en France que la théorie de Poisson-Mossotti pouvait "compléter" les insuffisances dont semblait affectée l'électrostatique de Maxwell. En particulier on avait cru que seule la théorie de Poisson-Mossotti pouvait offrir une "preuve" des équations caractéristiques des diélectriques. Le passage par cette théorie classique des diélectriques semblait d'autant plus légitime que Faraday et Maxwell ont souvent utilisé le mot "polarisation" dans leurs écrits (voir Appendice A).

Toutefois Maxwell lui-même, dans le Treatise, prend ses distances vis à vis la théorie des diélectriques de Mossotti. Cette théorie, affirme-t-il, est "mathématiquement équivalente" à la sienne, mais suppose la notion d'action à distance, qu'il exclue. Il ajoute :

"... Mossotti has deduced the mathematical theory of dielectrics from the ordinary theory of attraction merely by giving an electric instead of a magnetic interpretation to the symbols in the investigation by which Poisson has deduced the theory of magnetic induction from the theory of magnetic fluids. He assumes the existence within the dielectric of small conducting elements, capable of having their opposite surfaces oppositely electrified by induction, but not capable of losing or gaining electricity on the whole, owing to their being insulated from each other by a

non-conducting medium. This theory of dielectrics is consistent with the laws of electricity, and may be actually true. If it is true, the specific inductive capacity of a dielectric may be greater, but cannot be less, than that of a vacuum. No instance has yet been found of a dielectric having an inductive capacity less than that of a vacuum, but if such should be discovered, Mossotti's physical theory must be abandoned, although his formulae would all remain exact, and would only require us to alter the sign of a coefficient".<sup>66</sup>

Maxwell connaissait donc cette théorie, ne serait-ce que par l'intermédiaire de W. Thomson qui l'a développée dans un de ses mémoires (voir Appendice A). L'évidence irrefutable que le premier n'a pas voulu adopter la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti, se trouve dans la partie III du Treatise, qui traite de la théorie du magnétisme. Maxwell y expose la théorie du magnétisme par influence de Poisson, avant de donner sa préférence à la théorie du magnétisme de Weber, puis à celle d'Ampère.<sup>67</sup> Or, c'est justement cette théorie que Mossotti et W. Thomson ont transposé pour les milieux diélectriques.

La distinction dans le Treatise entre les approches utilisées dans l'étude des diélectriques d'une part, et dans celui du magnétisme par influence d'autre part, montre que Maxwell n'a pas voulu adopter la théorie de Poisson-Mossotti. La raison principale en était, il nous semble, l'hypothèse d'une action à distance qui est implicitement admise dans cette théorie. Il se peut également que Maxwell n'ignorait pas l'incompatibilité entre cette théorie et sa théorie du déplacement électrique.<sup>68</sup>

Poincaré dans l'ouvrage Electricité et Optique va aussi exposer la théorie de Poisson-Mossotti des diélectriques en rapport avec la théorie du déplacement électrique de Maxwell. Ses motivations sont, toutefois, différentes de ses prédécesseurs français qui ont abordé le sujet, ce qui a comme effet de déplacer la problématique.

D'abord nous ne trouvons pas, chez Poincaré, de critique sur les "insuffisances" du traitement des milieux diélectriques par Maxwell. Dans le chapitre I de son ouvrage, Poincaré entreprend "l'extension de la relation de Poisson" aux diélectriques de la même façon que Maxwell dans le §83a du Treatise.<sup>69</sup> L'idée maîtresse est chez lui, comme chez Maxwell, celle de "flux d'induction".<sup>70</sup> Or, Mathieu et Potier<sup>71</sup> n'ont pas accepté ce "raisonnement" de Maxwell comme constituant une preuve de l'équation de Poisson pour les diélectriques.

Une deuxième différence tient au fait que Poincaré développe non pas la théorie du déplacement électrique de Maxwell, mais une "théorie du fluide inducteur". Ainsi dans l'Introduction de son ouvrage il souligne son intention de donner plus de "précision" à l'électrostatique du Treatise :

"Je ne voulais pas conserver à la définition du déplacement électrique cette sorte d'indétermination qui est la cause de toutes ses obscurités; je ne voulais pas non plus en précisant la pensée de l'auteur, la dépasser et par conséquent la trahir".<sup>72</sup>

Dans le chapitre II de Electricité et Optique, que nous avons analysé longuement dans la section 2, Poincaré réussit à "déduire" les équations caractéristiques des diélectriques, de sa théorie du fluide inducteur. Il lui a fallu, cependant, interpréter le potentiel électrostatique comme la pression d'un fluide (électrique ou inducteur). Nous avons insisté sur le fait que ce raisonnement est étranger au Treatise. Poincaré croit, néanmoins, que cette théorie ne "trahit" pas la pensée de Maxwell. On comprend alors pourquoi Poincaré ne soulève pas les mêmes critiques que ses prédécesseurs contre la théorie des diélectriques de Maxwell.

Cette mise au point préliminaire aidera à comprendre ce qui a pu motiver Poincaré à introduire une exposition de la théorie de Poisson-Mossotti dans le volume I de l'ouvrage Electricité et Optique, consacré à la théorie de Maxwell.

Les objectifs explicites de Poincaré dans le chapitre sur "la

théorie des diélectriques de Poisson: Comment elle peut se rattacher à celle de Maxwell", sont mis en évidence dans l'Introduction de l'ouvrage :

"J'ai pris le parti d'exposer successivement deux théories complètes, mais entièrement différentes. J'espère que le lecteur distinguera ainsi sans peine ce qu'il y a de commun à ces deux théories et par conséquent ce qu'elles contiennent d'essentiel. Il sera averti en outre qu'aucune des deux ne représente le fond des choses. Dans la première j'admets l'existence de deux fluides, électricité et fluide inducteur, qui peuvent être aussi utiles que les deux fluides de Coulomb, mais qui n'ont pas plus de réalité objective. De même l'hypothèse de la constitution cellulaire des diélectriques, n'est destinée qu'à faire mieux comprendre l'idée de Maxwell en la rapprochant des idées qui nous sont plus familières. En agissant ainsi, je n'ajoute rien à la pensée de l'auteur anglais et je n'en retranche rien non plus; car il importe d'observer que Maxwell n'a jamais regardé " what we may call an electric displacement " comme un véritable mouvement d'une véritable matière".<sup>73</sup>

Les objectifs annoncés relèvent donc de deux ordres de considérations: épistémologique et pédagogique. Ce chapitre semble, d'un côté, venir en appuie de la conception de Poincaré sur l'objet des théories physiques: il faut les considérer comme des instruments de recherche qui ne visent pas la description d'une "réalité" sous-jacente aux phénomènes. Encore une fois Poincaré présente Maxwell comme un partisan de cette même conception des théories physiques. L'exposition de la théorie de Poisson-Mossotti vise, de l'autre côté, un but pédagogique: éclaircir la théorie de Maxwell en faisant appel à des "idées plus familières". Il ne s'agira pas dans ce chapitre de fonder l'une des deux théories sur l'autre. La théorie du déplacement électrique, ou, plutôt, la théorie du fluide inducteur, est en fait considérée comme acceptable. Quand Poincaré montre qu'il est possible de déduire les principales conséquences de cette théorie d'une autre théorie tout à fait différente (en ce qui concerne les hypothèses de base) il vise surtout un but épistémologique.

Il reste cependant le fait que ce chapitre est le seul, dans le

vol. I d'Electricité et Optique, qui se rattache naturellement aux thèmes qui seront développés dans le vol. II de cet ouvrage.

La théorie de Poisson-Mossotti des diélectriques est le fondement de l'électrostatique de Helmholtz. Comme nous le verrons, Poincaré effectue, dans le volume I, le "passage" de cette électrostatique à l'électrostatique de Maxwell. Nous montrerons que les conditions pour accomplir ce "passage" sont exactement les mêmes que celles qui seront posées dans le volume II, pour qu'il obtienne les principales conséquences des théories de Maxwell à partir de la théorie de Helmholtz. Poincaré fera alors référence aux liens théoriques entre ces deux accomplissements.

Rien n'est dit cependant, dans le chapitre III du vol. I, qui puisse annoncer les développements du vol. II. Dans ce contexte, le changement de notation qui se vérifie entre les deux volumes, ainsi que les perspectives différentes dans lesquelles les questions sont traitées, peuvent être significatifs. Tout cela porte effectivement à croire que ces deux "passages" ne relèvent pas d'un projet unique élaboré dès les leçons de 1887/8.

Nous croyons important de détecter les continuités et discontinuités entre les deux volumes de l'ouvrage Electricité et Optique étant donné l'événement historique majeur qui les sépare: la "découverte" des ondes électromagnétiques. Certains historiens soutiennent, en fait, que l'expérience de Hertz de 1888 a motivé directement la comparaison entre les deux théories électrodynamiques rivales.<sup>74</sup> Nous allons voir par la suite que les développements du chapitre III, vol. I, de l'ouvrage de Poincaré reflètent déjà, avant la célèbre expérience de Hertz, un travail de comparaison entre les formalismes de deux théories, qui englobera, à partir du vol. II, l'électrodynamique, ce qui contredit cette thèse historiographique.

Mis à part l'enjeu historiographique que nous attrachons à ce lien thématique entre les deux volumes de Electricité et Optique, nous nous sommes aussi posés les questions suivantes sur un éventuel enjeu philosophique: est-ce que les thèses épistémologiques que Poincaré associe au "passage" de la théorie de Poisson-Mossotti à la théorie du "fluide

inducteur", peuvent être transposées au "passage" de la théorie de Helmholtz à la théorie de Maxwell ? Quel est le rôle qu'y jouent les hypothèses de base des diverses théories et le formalisme dans ces "passages" ? Quels sont les critères qui permettent d'établir l'équivalence entre deux théories qui se rapportent aux mêmes phénomènes physiques ? S'il est question de faire un choix, sur quelles bases le faire ? Nous avons également gardé ces questions en tête dans les analyses qui suivent.

### La Théorie des Cellules Electriques de Poincaré

L'objectif du chapitre 3 de Electricité et Optique ("Théorie des diélectriques de Poisson - comment elle peut se rattacher à celle de Maxwell"), est de comparer deux "théories": la "théorie du fluide inducteur" de Maxwell et la "théorie des cellules". Cette dernière est une théorie obtenue à partir de la théorie de Poisson-Mossotti sur les diélectriques en apportant quelques "modifications secondaires" à celle-ci, de façon à "faire concorder ses résultats avec ceux de la théorie de Maxwell". Poincaré montrera que ces deux théories sont "identiques" du "point de vue mathématique".

Avec cette comparaison il vise, à notre avis, un but épistémologique: étayer sa conception du rôle des théories physiques. Il affirme notamment à la fin du chapitre :

"La théorie des cellules ne peut pas être adoptée plus définitivement que celle du fluide inducteur (...). 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".

Mais le rapprochement de la théorie de Maxwell avec celle de Poisson-Mossotti sur les diélectriques repose aussi sur un lien historique que Poincaré (de même que Duhem) voit entre elles :

"Il est probable que c'est la conception de Poisson et Mossotti sur la nature des diélectriques qui a conduit Maxwell à sa théorie. Il dit l'avoir déduite des travaux de Faraday et n'avoir fait que traduire sous forme mathématique les vues de ce célèbre physicien; or, Faraday avait adopté les idées de Mossotti".

C'est Mossotti, affirme Poincaré, qui a transporté la théorie de Poisson du magnétisme par influence à l'électrostatique. Nous reprenons encore une fois l'hypothèse de base de cette théorie :

"Dans cette hypothèse, l'air est le seul diélectrique homogène; quant aux autres diélectriques, il se les représente comme constitués par de petites sphères conductrices disséminées dans une substance non conductrice jouissant des mêmes propriétés que l'air. Les phénomènes attribués au pouvoir inducteur spécifique s'expliquent alors par les effets répulsifs et attractifs dans l'électricité induite par influence dans les sphères conductrices".<sup>75</sup>

#### La Définition de la Grandeur "Déplacement Electrique" dans la Théorie de Poisson-Mossotti

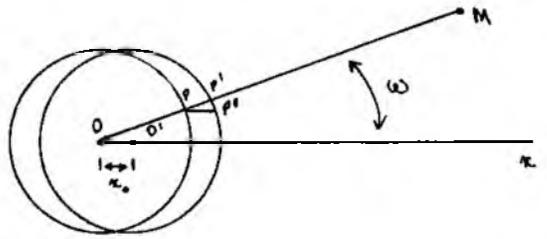
Poincaré commence par "construire" la sphère conductrice polarisée dans la théorie de Poisson-Mossotti.

Il suppose que chaque sphère conductrice neutre est en fait composée de deux sphères chargées uniformément, l'une d'électricité négative et l'autre d'électricité positive, en quantités égales. Si ces deux sphères sont placées dans un champ électrique uniforme, leurs centres vont s'écarter jusqu'à ce que l'équilibre électrique soit rétabli .

Si l'on suppose la direction "x" parallèle aux lignes de force du champ, les centres 0 et 0' seront séparées, disons, d'une distance  $x_0$ , telle que, à l'équilibre, on aura :

$$\frac{d\psi}{d\kappa} = -\frac{4}{3} \pi \kappa_0 \quad (1)$$

où la densité de charge de chaque sphère est considérée égale à 1, et  $\psi$  est le potentiel associé au champ extérieur uniforme. La sphère chargée négativement est supposée avoir son nouveau centre au point 0', le champ extérieur ayant donc un sens contraire à celui de l'axe "x".



La distribution d'électricité sur la sphère conductrice polarisée peut être alors calculée comme une fonction de la distance PP' représentée sur la figure.

Un diélectrique est polarisé dans la théorie de Mossotti-Poisson si chacune des sphères conductrices qui la composent est polarisée dans le sens qu'on vient de définir (les petites dimensions de chaque sphère permettent de considérer le champ comme uniforme dans son voisinage, et Poincaré montre aussi qu'on peut négliger l'influence des sphères voisines sur la distribution électrique d'une sphère donnée).

Poincaré va montrer qu'on peut définir un "déplacement électrique" dans la théorie de Poisson-Mossotti. Le déplacement des fluides contenus dans chaque sphère conductrice est mesuré par  $x_0$ , c'est-à-dire la distance entre les centres 0 et 0' dans le modèle de polarisation proposé.

Ce déplacement est donné par l'équation (1) :

$$\kappa_0 = \frac{3}{4\pi} \frac{d\psi}{d\kappa} \quad ,$$

en supposant que la densité de chaque fluide est égale à 1. Comme les sphères conductrices n'occupent qu'une fraction  $h$  du volume total du diélectrique, la valeur moyenne du déplacement pour l'ensemble du diélectrique peut être obtenue en supposant que les fluides sont répandus dans le volume total du diélectrique, mais qu'ils ont une densité égale à  $h$ .

Le déplacement moyen sera :

$$\bar{\kappa}_0 = h \frac{3}{4\pi} \frac{d\psi}{d\kappa} \quad ,$$

et le déplacement du fluide positif<sup>76</sup> par rapport au fluide négatif sera donc :

$$f' = -h \frac{3}{4\pi} \frac{d\psi}{d\kappa} \quad (2)$$

où, h est, comme plus haut, le rapport entre le volume total des sphères et le volume du diélectrique.

Comme dans la théorie de Poisson-Mossotti le vide (où l'air) ne contient pas des sphères conductrices, le déplacement électrique est nul dans ce milieu.

Poincaré propose de comparer le déplacement électrique (2) déduit de cette théorie, avec celui prévu par la théorie de Maxwell. Or, dans cette dernière théorie, le déplacement est donné par l'équation :

$$f = -\frac{K}{4\pi} \frac{dU}{d\kappa} \quad (3)$$

où K est le pouvoir inducteur spécifique du diélectrique et U est le potentiel électrostatique en un point du diélectrique. Pour comparer les équations (2) et (3) il faudra définir ces deux grandeurs à l'intérieur de la théorie de Poisson-Mossotti.

#### Le Pouvoir Inducteur Spécifique et la Fonction Potentiel Electrostatique dans la Théorie de Poisson-Mossotti

Poincaré commence par calculer le potentiel associé à un diélectrique polarisé dans un point extérieur au diélectrique. Ce potentiel est obtenu par intégration, sur le volume du diélectrique, des effets dûs à chaque sphère polarisée. Le résultat donne le potentiel de polarisation:

$$V = \int \left( A \frac{d^1/r}{d\kappa} + B \frac{d^1/r}{dy} + C \frac{d^1/r}{dz} \right) d\tau \quad (4)$$

où  $r$  est la distance d'un point quelconque du diélectrique à un point extérieur et  $dx$  est un élément de volume. (A, B, C) sont les composantes de la polarisation, définies par les relations :

$$A = -\frac{3h}{4\pi} \frac{d\psi}{dx}, \text{ etc.} \quad (5)$$

où  $\psi$  et  $h$  gardent les significations données plus haut.

Une molécule d'électricité située à l'intérieur d'un diélectrique polarisée subira l'influence des distributions de charge existant éventuellement à l'extérieur du diélectrique et l'influence de l'ensemble des sphères polarisées. Pour déterminer ce dernier facteur il faut supposer qu'on creuse une cavité à l'intérieur du diélectrique, dont les dimensions sont très petites par rapport aux dimensions de ce dernier. On calcule alors l'action électrostatique sur une molécule située à l'intérieur de cette cavité. Ce calcul dépend de la forme de la surface de la cavité.<sup>77</sup> Poincaré va supposer que cette cavité est sphérique.<sup>78</sup>

Soit  $V$  le potentiel donné par les expressions (4) et (5), associé au diélectrique qui se trouve donc dans un état de polarisation comme s'il était sous l'influence d'un champ uniforme  $-\frac{d\psi}{dx}$ . Soit

$V_1$  le potentiel associé à une distribution extérieure de charge. La molécule électrique à l'intérieur de la cavité sphérique doit être en équilibre sous l'action simultanée de la distribution extérieure de charge et de l'action des sphères polarisées. Le potentiel effectif dans un point de la cavité est donc :

$$U = V + V_1 \quad (6)$$

Il convient d'insister sur la distinction entre ce potentiel effectif et le potentiel  $\psi$ . Ce dernier — d'après la définition qui donne Poincaré — "désigne le potentiel du champ uniforme que produirait sur chaque sphère conductrice leur polarisation actuelle ...".<sup>79</sup> Le potentiel  $\psi$  est utilisé, — comme nous l'avons mis en évidence dès le départ — pour définir le déplacement électrique moyen, équation (2), dans la théorie de Poisson-Mossotti.

La condition d'équilibre de la molécule électrique à l'intérieur de la cavité est exprimée par l'équation :

$$\frac{dU}{d\xi} = \frac{4}{3} \pi \left(1 - \frac{1}{h}\right) A \quad (7)$$

Si l'on définit maintenant un coefficient  $K$  par :

$$K - 1 = \frac{3h}{1-h} \quad , \quad (8)$$

les équations d'équilibre pour un choix arbitraire des axes coordonnés prendront la forme :

$$(1-K) \frac{dU}{d\kappa} = 4\pi A \quad , \quad \text{etc.} \quad (9)$$

Pour montrer que le coefficient  $K$  peut être interprété comme le pouvoir inducteur spécifique du diélectrique, il faut considérer la grandeur "charge électrique" à l'intérieur de la théorie de Poisson - Mossotti.

L'intégration par parties de l'expression (4) de  $V$ , permet de la diviser en une intégrale sur la surface et une intégrale sur le volume du diélectrique :

$$V = \int_S \frac{d\omega}{r} (\ell A + m B + n C) - \int_V \frac{d\tau}{r} \left( \frac{dA}{d\kappa} + \frac{dB}{dy} + \frac{dC}{dz} \right) \quad (10)$$

( $\ell, m, n$  sont les cosinus directeurs de la normale à la surface du diélectrique).

Cette dernière forme du potentiel d'un diélectrique polarisé, permet de le considérer comme ayant une densité superficielle de charge donnée par :

$$\sigma = \ell A + m B + n C \quad , \quad (11)$$

et une densité volumétrique de charge donnée par :

$$\rho = \frac{dA}{d\kappa} + \frac{dB}{dy} + \frac{dC}{dz} \quad . \quad (12)$$

Ces densités de charge sont "fictives", au sens où elles produisent, en un point extérieur au diélectrique, les mêmes effets que le diélectrique polarisé.

La signification physique de la constante  $K$  apparaît si on prend les dérivées par rapport à  $x, y, z$ , de chacune de équations (9) et si on les additionne (il faut remarquer que :

$$\Delta U = \Delta V_1 + \Delta V = \Delta V = 4\pi \left( \frac{dA}{d\kappa} + \frac{dB}{dy} + \frac{dC}{dz} \right) \quad )$$

L'équation résultante sera:

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dU}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( k \frac{dU}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left( k \frac{dU}{dz} \right) = 0 \quad , \quad \text{l'équa-}$$

tion de Poisson pour les diélectriques. Cette déduction montre que  $K$  peut être interprété comme le pouvoir inducteur spécifique du diélectrique. A la suite de l'équation (8) on peut voir que dans la théorie de Poisson-Mossotti, le pouvoir inducteur est lié à un certain rapport du volume de l'ensemble des sphères conductrices au volume total du diélectrique.

#### Le "Passage" de la Théorie de Poisson-Mossotti à la Théorie du Déplacement Electrique

Revenons à l'équation (3) du déplacement électrique dans la théorie de Maxwell. Les grandeurs qui y figurent peuvent maintenant être interprétées par la théorie de Poisson-Mossotti. Nous pouvons donc écrire, à partir de cette équation et des équations (5), (8) et (9) :

$$f = - \frac{\epsilon}{4\pi} \frac{k}{k+2} \frac{d\psi}{dx} = - \frac{(1+2h)}{4\pi} \frac{d\psi}{dx} \quad (13)$$

La comparaison entre les équations (2) et (13) montre que le déplacement électrique n'a pas la même valeur dans la théorie de Poisson-Mossotti et dans celle de Maxwell. En particulier cette dernière prévoit un déplacement électrique dans le vide ( $k=1$ ) égal à :

$$f_{\text{vide}} = - \frac{1}{4\pi} \frac{d\psi}{dx} \quad (14)$$

La théorie de Poisson-Mossotti prévoit un tout autre résultat. Puisque dans le vide il n'y a pas de sphères conductrices, nous avons  $h=0$ , et l'équation (2) donne :

$$f'_{\text{vide}} = 0 \quad (15)$$

Pour voir que dans la théorie de Poisson-Mossotti il n'y a pas de possibilité de faire concorder les valeurs de  $f'$  et  $f$ , il suffit de calculer le rapport entre ces grandeurs :

$$\frac{f'}{f} = \frac{K-1}{K} = \frac{3h}{1+2h} \quad (16)$$

Or, si l'on fait tendre  $h$  vers 1 alors  $f'/f$  tend vers 1. Mais d'après l'équation (8) on aurait aussi, dans cette limite,  $K \rightarrow \infty$  ce qui est absurde puisque le pouvoir inducteur spécifique est, expérimentalement, fini.

La difficulté réside, selon Poincaré,

"... à ce que nous avons pris l'unité pour le pouvoir inducteur spécifique de la substance isolante qui sépare les sphères conductrices dans celle de Poisson".<sup>80</sup>

Il propose par la suite une modification dans les hypothèses de base de la théorie, de façon à qu'elle puisse "concorde ses résultats avec ceux de la théorie de Maxwell" :

"Il serait facile de vérifier — continue Poincaré — que si nous désignons par  $K_1$  le pouvoir inducteur de cette substance, les formules (8) et (16) deviennent :

$$h = \frac{K - K_1}{K + 2K_1} \quad (17)$$

$$\frac{f'}{f} = \frac{K - K_1}{K} \quad (18)$$

Cette dernière formule montre que si  $K_1$  est très petit le rapport des déplacements est voisin de l'unité".<sup>80</sup>

Poincaré ne donne pas de preuve de ces équations. Il ne discute, non plus, ce que suppose la modification suggérée. Il se limite à en explorer les conséquences.

Il est en tout cas vrai, que maintenant on peut faire concorder  $f'$  et  $f$  en faisant tendre  $K_1$  vers zéro, sans aboutir à des conséquen-

ces physiques inadmissibles. Mais cette condition implique  $h \rightarrow 1$ , d'après l'équation (17). Cette conséquence revient à réduire infiniment le volume occupé par la "substance isolante" par rapport au volume total du diélectrique, qui devient complètement occupé par la masse conductrice capable de se polariser.

L'interprétation de cette limite  $h \rightarrow 1$  est, cependant, problématique dans l'hypothèse de la présence d'éléments conducteurs sphériques. Poincaré se propose alors de changer ce support "ontologique" de la théorie, en introduisant ses "cellules conductrices":

"Or, nous n'avons introduit l'hypothèse de la forme sphérique des conducteurs disséminés dans le diélectrique que pour avoir plus de simplicité dans les calculs; les conséquences restant vraies pour une forme quelconque des conducteurs nous pouvons nous représenter un diélectrique comme formé de CELLULES conductrices séparées par des cloisons non conductrices. Il suffit alors pour faire concorder la théorie de Poisson avec celle de Maxwell de supposer que ces cloisons ont une épaisseur infiniment petite, puisque alors  $h$  diffère infiniment peu de l'unité, et, qu'elles sont formées d'une substance isolante de pouvoir inducteur spécifique  $K_1$  infiniment petit". 81

Poincaré montre finalement qu'on peut obtenir, à partir de cette théorie, la condition d'incompressibilité pour le "fluide inducteur":

$$\frac{df}{d\pi} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0 \quad (19)$$

La théorie des cellules peut aussi conduire à la même expression pour l'énergie potentielle électrostatique que la théorie de Maxwell :

$$W = \int \frac{2\pi}{K} (f^2 + g^2 + h^2) dx \quad (20)$$

Au sujet de cette expression Poincaré signale que, de même que dans la théorie de Maxwell, dans la théorie des cellules ,

"... l'énergie potentielle d'un système électrisé se trouve dans le milieu diélectrique qui sépare les conducteurs". 82

Poincaré réussit donc à atteindre l'objectif qu'il s'était posé au départ, à savoir que la théorie du "fluide inducteur" (qu'il identifie à la théorie du déplacement électrique de Maxwell) conduit aux mêmes résultats que la théorie de Poisson-Mossotti, en introduisant des hypothèses adéquates. Il atteint surtout un objectif épistémologique: montrer que deux théories différentes par leurs hypothèses de base, peuvent, néanmoins, conduire aux mêmes résultats. La théorie du fluide inducteur et celle des cellules électriques seraient "incompatibles" si l'on considère qu'elles reflètent une "réalité objective". Elles sont "provisoires" et "utiles" si l'on adopte, comme Poincaré, la conception suivant laquelle l'objet de la théorie physique est celui d'être un instrument de recherche.

Que suppose l'Equivalence Observationnelle de la Théorie de Poisson-Mossotti et de la Théorie des Cellules ?

Une analyse de la proposition qui a conduit aux équations (17) et (18) s'impose par ses liens avec le "passage" de la théorie de Helmholtz à la théorie de Maxwell, qui sera traité dans le deuxième volume de Electricité et Optique. En particulier, nous verrons que l'équation (17) mise sous la forme :

$$K = \frac{K_1(1+2h)}{1-h} \quad (17')$$

est identique à une des équations fondamentales que Poincaré va écrire dans le deuxième volume.

Nous commencerons par montrer que l'hypothèse selon laquelle le pouvoir inducteur de la substance isolante qui sépare les sphères conductrices est  $K_1 = 1$ , découle de l'équation (8). Si nous faisons  $h = 0$  dans cette équation, il vient que  $K = 1$ . Or, la condition  $h = 0$  correspond à un milieu sans sphères de Mossotti et donc occupé

complètement par la substance isolante. Cela prouve la proposition. Cette substance isolante est impolarisable par hypothèse. Dans la théorie de Poisson-Mossotti l'air (ou le vide), qui a un pouvoir inducteur  $K_0$  aussi égal à 1, possède cette même propriété de la "substance isolante": l'impolarisabilité.

Les conséquences de l'équation (17') sont toutes autres. Si nous faisons  $h=0$  nous obtenons bien  $K=K_1$ , ce qui est en accord avec la modification introduite. Dans la théorie des cellules le pouvoir inducteur de la "substance isolante" est donc  $K_1 = K_1$ , ce qui doit encore correspondre à un milieu impolarisable. Il faut que  $K_1 \leq K$  puisque  $h$  est, par définition, une quantité positive (voir éq. 17).

Dans cette nouvelle théorie l'air devient, toutefois, un milieu polarisable, puisque en faisant  $K=1$  nous obtenons, d'après l'équation (17) :

$$h_0 = \frac{1 - K_1}{1 + 2K_1},$$

ce qui peut être interprété en disant que l'air (ou le vide) possède des sphères de Mossotti.

Toutes ces conséquences, ainsi que l'équation (18), supposent qu'on puisse encore interpréter  $K$  comme étant le pouvoir inducteur spécifique du milieu, ce que Poincaré ne prouve pas.

Si nous appliquons l'équation (17) dans l'équation (7), nous obtenons, au lieu des équations (9) :

$$\left( \frac{K_1 - K}{K_1} \right) \frac{dU}{d\xi} = 4\pi A \quad (9')$$

Or, il est facile de vérifier qu'on ne pourra plus alors obtenir l'équation de Poisson pour les diélectriques à partir de l'équation (9'), de façon à ce que le coefficient  $K$  puisse être interprété comme le pouvoir inducteur spécifique du milieu.

Le problème est donc beaucoup moins simple qu'il ne le semble. Il ne sera abordé par Poincaré que dans le volume II de son ouvrage. La notation va cependant changer, et il est difficile de voir le lien avec les discussions du premier volume. Nous essayerons, par la suite, de suppléer à ce que Poincaré laisse implicite (ou qui peut être ne le concerne pas) dans le chapitre III du vol. I de Electricité et Optique.

La modification introduite dans la théorie de Poisson-Mossotti touche, en vérité, aux fondements mêmes de cette théorie. Si le pouvoir inducteur de la substance isolante n'est plus égal à celui de l'air, alors ce dernier milieu sera capable de se polariser. Dans ce cas on ne peut plus donner la même expression à la force de Coulomb entre deux charges  $m$  et  $m'$ , placées dans ce milieu. En fait, l'équation (4) supposait que cette force puisse être donnée, dans l'air, par :

$$F = \frac{m m'}{r^2} \quad (21)$$

Maintenant comme ce milieu est polarisable, la force mesurée sera plutôt :

$$F' = \frac{1}{\lambda} \frac{m m'}{r^2}, \quad (22)$$

où  $\lambda$  est un facteur dont la signification physique va apparaître par la suite.

L'expression (21) n'est valable que dans le cas où les charges  $m$  et  $m'$  sont placées dans un milieu impolarisable idéal.

Si l'on admet l'expression (22), alors on arrivera, non pas à l'équation (7) mais à l'équation :

$$-\frac{dU}{d\kappa} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{1-h}{h}\right) \frac{A}{\lambda} \quad (7')$$

En faisant  $\lambda = K_1$ , où  $K_1$  est le pouvoir inducteur de la substance isolante qui sépare les sphères de Mossotti, on obtiendra au lieu de l'équation (9') :

$$(K_1 - K) \frac{dU}{d\kappa} = 4\pi A \quad (9'')$$

Il est maintenant possible d'obtenir l'équation de Poisson pour le diélectrique, où  $K$  est le pouvoir inducteur spécifique de ce-dernier.

Nous pouvons donc affirmer que la condition  $K_1 \rightarrow 0$ , qui assure l'équivalence mathématique de la théorie du fluide inducteur et de la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti, correspond à la condi -

tion  $\lambda \rightarrow 0$  que Poincaré va imposer à la théorie de Helmholtz pour faire concorder ses conséquences avec celles prévues par la théorie de Maxwell.

Nous croyons pouvoir conclure que Poincaré était déjà en possession, dès 1887/8, de la "condition de passage" pour les deux théories électrodynamiques concurrentes.

SECTION V.4- LE CHOIX ENTRE LES THEORIES DE HELMHOLTZ  
ET DE MAXWELL

Le deuxième volume de Electricité et Optique s'ouvre sur l'exposition des théories électrodynamiques "continentales", où une large place est accordée aux théories de Helmholtz. Poincaré reconsidère ensuite les conditions de "passage" de la théorie de Helmholtz à la théorie de Maxwell. Le restant de l'ouvrage tente finalement de décider en faveur de l'une des théories électrodynamiques, en faisant appel à certains "principes" et à l'expérience.

Ce qui confère un caractère original aux leçons de Poincaré données à la Sorbonne pendant le second semestre 1889/90, est la comparaison qu'il mène des théories de Maxwell et de Helmholtz.<sup>83</sup> D'après les données dont nous disposons, il n'y a pas eu d'initiative comparable en France avant Poincaré. Si Mathieu compare certaines conséquences de la théorie du déplacement électrique de Maxwell avec la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti (qui est reprise par Helmholtz), il n'y a pas, cependant chez lui, de tentative semblable en ce qui concerne l'électrodynamique ou la théorie de la propagation d'ondulations électromagnétiques.<sup>84</sup>

En dehors de la France, la comparaison entre les deux théories a été entreprise d'abord par Helmholtz lui-même en 1870. Hertz, en 1884, a également essayé une comparaison des formalismes des deux théories.<sup>85</sup> Ensuite nous connaissons au moins deux autres tentatives avant celle de Poincaré: celles dues à J.J. Thomson en 1885, et à Glazebrook à la même époque.<sup>86</sup> Poincaré arrive, toutefois, à des conditions de "passage" d'une théorie à l'autre différentes de ces auteurs.

Pour une présentation de l'électrodynamique de Helmholtz de 1870, et de son insertion dans le programme continental, nous renvoyons le lecteur à l'Appendice B.

Nous allons, par la suite, faire une analyse détaillée du chapitre V, vol. II, d'Electricité et Optique, qui porte comme titre :

"Passage de la théorie de Helmholtz à celle de Maxwell". Nous essayerons de le rapprocher de certains développements du vol. I de ce même ouvrage, en cherchant à déceler un éventuel changement de perspective dans le traitement du sujet.

Il faudrait initialement souligner que Poincaré formule la théorie de Helmholtz en utilisant les notations de Maxwell, de manière à pouvoir comparer les deux théories:

"J'ai dû assez profondément modifier le mode d'exposition de Helmholtz; ce savant emploie en effet des notations nouvelles tout à fait différentes de celles de Maxwell; l'identité des équations auxquelles conduisent les deux théories, dans le cas où elles sont d'accord, se trouve ainsi artificiellement dissimulée; le but principal de Helmholtz est ainsi moins complètement atteint qu'il ne pourrait l'être".<sup>87</sup>

Une deuxième modification d'importance concerne les unités employées. Helmholtz avait employé les unités électrostatiques, tandis que Poincaré emploie les unités électromagnétiques.<sup>88</sup> Le problème que pose l'usage des unités électrostatiques est lié, justement, au "passage" de la théorie de Helmholtz à la théorie de Maxwell. La question mérite donc qu'on s'y arrête, puisque c'est sur ce point que se révèle l'originalité de la comparaison effectuée par Poincaré des deux théories.

Le mémoire de Helmholtz de 1870 présente deux parties bien distinctes.

Dans la première partie ce savant développe les conséquences de l'expression proposée du potentiel électrodynamique de deux éléments de courant, sans considérer les milieux diélectriques et magnétiques. Le vide, en particulier, ne présente aucune propriété diélectrique ou magnétique (il n'est pas considéré comme capable de polarisation). L'unité de charge est définie par une expérience électrostatique réalisée dans ce vide impolarisable. Ainsi deux unités de charge, séparées d'une unité de

distance se repoussent par une force unitaire. La force Coulombienne est donc exprimée en unités électrostatiques par :

$$F = \frac{e e'}{r^2} \quad (1)$$

Le potentiel électrostatique  $\varphi$  s'écrit, par la suite :

$$\varphi = \int \frac{\rho}{r} d\tau \quad (2)$$

où  $\rho$  est la densité de charge,  $d\tau$  un élément de volume et  $r$  la distance.

Dans la deuxième partie de son mémoire (selon la division que nous proposons ici) Helmholtz étudie les milieux capables de polarisation diélectrique ou magnétique. Le "vide" lui-même est supposé capable de polarisation. L'équation (1) ne pourra plus donner, alors, la valeur correcte de la force dans un vide polarisable. Helmholtz écrira en conséquence :

$$F = \frac{1}{1 + 4\pi\epsilon_0} \frac{e e'}{r^2} \quad (1')$$

où  $\epsilon_0$  est la constante de polarisation diélectrique du vide. L'équation (2) devra être aussi modifiée de façon à englober aussi le potentiel de polarisation.

Dans la théorie de Helmholtz, l'unité électrostatique de charge est donc définie par rapport à une "expérience" effectuée dans un milieu impolarisable idéal.

Pour éviter la présence de deux expressions différentes de la force de Coulomb dans une même théorie, et aussi pour ne pas adopter une unité particulière de charge, Poincaré introduit dès le départ, dans l'exposition de la théorie de Helmholtz, un nouveau paramètre  $\lambda$ , et il écrit :

$$F = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{e e'}{r^2} \quad (1'')$$

$$\varphi = \frac{1}{\lambda} \int \frac{\rho}{r} d\tau \quad (2')$$

Il laissera  $\lambda$  indéterminé au départ ce qui va lui permettre, comme nous le verrons par la suite, de fournir un nouvel éclairage sur les conditions de "passage" de la théorie de Helmholtz à celle de Maxwell.

Concernant ce paramètre, Poincaré affirme :

"Si l'on adopte les idées universellement reçues,  $\lambda$  est 1 dans le système d'unités électrostatiques et le carré de la vitesse de la lumière dans le système électromagnétique. Je conserve  $\lambda$  parce que nous serons conduits à modifier un peu les idées reçues".<sup>89</sup>

Effectivement, nous verrons que les valeurs qui seront assignées au paramètre  $\lambda$  vont aussi dépendre de la théorie électrodynamique adoptée.<sup>90</sup>

Dans la formulation de Poincaré, les équations de la théorie de Helmholtz seront alors affectées de deux paramètres indéterminés: le  $k$  de l'expression du potentiel électrodynamique et le  $\lambda$  de l'expression (1") ci-dessus.<sup>91</sup>

Nous allons diviser la comparaison entre les théories de Helmholtz et de Maxwell que nous offre Poincaré, en trois parties: l'électrostatique, l'électrodynamique et la propagation d'ondulations électromagnétiques.

#### ELECTROSTATIQUE : le Paramètre de Poincaré

En électrostatique la comparaison concerne fondamentalement le traitement des milieux diélectriques dans chaque théorie. Comme la théorie de Helmholtz suppose la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti, cette comparaison s'attache naturellement aux développements du vol. I, que nous avons analysés dans la section précédente. Poincaré modifie, cependant, la notation<sup>92</sup>, et nous verrons que les démarches employées présentent des différences significatives.

Dans le chapitre III du premier volume Poincaré a montré comment on peut définir, dans de la théorie de Poisson-Mossotti, un "déplacement électrique". Il a mis en évidence que la valeur de ce déplacement tend vers la valeur du déplacement prévue par la théorie de Maxwell si l'on fait tendre  $K_1$  vers zero (  $K_1$  recevant la signification de "pouvoir inducteur spécifique de la substance isolante qui sépare les sphères de Mossotti" ).

Dans le vol. II Poincaré reprend l'analogie entre la théorie du magnétisme par influence et la théorie des diélectriques. Le paramètre

$\lambda$  va figurer, dès le départ, dans l'expression du potentiel électrostatique  $\varphi$  (qui comprend ainsi le potentiel de polarisation), comme dans l'équation (2'). La condition à laquelle il aboutit pour qu'il y ait équilibre dans le diélectrique polarisé est :

$$\frac{4}{3} \pi \frac{f}{\lambda} \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon} = - \frac{d\varphi}{d\kappa} - \frac{dF}{dt} + X$$

Cette équation se rapproche de l'équation (7') de la section précédente, compte-tenu du changement de notation, de l'inclusion de la force d'induction (  $-dF/dt$  ), et d'une force électromotrice d'origine quelconque  $X$ . Nous signalons que les composantes (f, g, h) désignent maintenant la même grandeur que les composantes (A, B, C) de la polarisation, définies par les équations (5) du volume I.

Le pouvoir inducteur spécifique du milieu,  $K$ , est défini par l'expression :

$$K = \frac{\lambda(1+2\epsilon)}{1-\epsilon} \quad (3)$$

La comparaison de cette expression avec l'expression (17') de la section antérieure, permet d'identifier<sup>93</sup>  $\lambda$  et  $K_1$ .

Avec la définition (3), la condition d'équilibre peut être écrite :

$$\frac{4\pi f}{K-\lambda} = - \frac{d\varphi}{d\kappa} - \frac{dF}{dt} + X \quad (4)$$

Poincaré n'attribuera pas, dès le départ, une signification physique à  $\lambda$ , comme il a fait avec  $K_1$  au volume I. Initialement  $\lambda$  reste un paramètre non-interprété, introduit par l'intermédiaire de l'ex -

pression du potentiel électrostatique.

Poincaré montrera par la suite que les expériences électrostatiques ne permettent pas de déterminer  $\lambda$ . Les conséquences électrostatiques testables de la théorie sont, en fait, indépendantes de ce paramètre. Dans l'expression de l'énergie électrostatique (voir (13) plus bas) à laquelle parvient Poincaré, ne figure, effectivement, que le pouvoir inducteur  $K$  et non pas  $\lambda$ . Donc la force électrostatique est indépendante de ce dernier paramètre.

Cela implique que, tant qu'on reste dans le domaine de l'électrostatique, on peut changer la valeur de  $\lambda$  sans avoir une influence quelconque sur les conséquences testables de la théorie, dès qu'on change également  $\epsilon$ , de façon à ce que le pouvoir inducteur  $K$ , défini par l'expression (3), reste compatible avec l'expérience.

Or,  $\epsilon$  a la même signification ici que  $h$  dans le vol. I: c'est le rapport du volume occupé par les sphères de Mossotti au volume total du diélectrique. Ce coefficient détermine, donc, la polarisabilité du milieu.

Dans l'électrostatique traditionnelle, laquelle inclut la théorie des diélectriques de Mossotti, le vide était considéré comme un milieu impolarisable. Si  $\epsilon_0$  est la susceptibilité diélectrique du vide, on admettait donc, dans cette électrostatique, la condition  $\epsilon_0 = 0$ . Appelons  $K_0$  le pouvoir inducteur du vide, déterminable par l'expérience. Dans la théorie de Mossotti on avait donc, d'après l'expression (3):

$$K_0 = \lambda$$

D'après cette théorie deux charges  $q$  et  $q'$ , placées dans le vide, se repoussent avec une force :

$$F = \frac{1}{K_0} \cdot \frac{q q'}{r^2}$$

Cependant, Poincaré a montré qu'on peut changer la valeur de  $\lambda$  sans affecter les résultats empiriques en électrostatique, dès qu'on change aussi la valeur donnée à  $\epsilon$ . En ce qui concerne le vide, on peut ainsi donner à  $\lambda$  n'importe quelle valeur plus petite que  $K_0$ , ce qui conduit à la condition  $\epsilon_0 \neq 0$ , d'après l'expression (3). L'éther

devient alors un milieu polarisable. La susceptibilité diélectrique du vide sera:

$$\epsilon_0 = \frac{K_0 - \lambda}{K_0 + 2\lambda}$$

Mais d'après l'équation (1'')  $1/\lambda$  est la force "réelle" (c'est-à-dire, dans un milieu impolarisable idéal) entre deux unités de charge. La force mesurée reste, évidemment,  $1/K_0$ , et on peut toujours fournir un couple  $(\lambda, \epsilon)$  qui rend la théorie compatible avec cette donnée. Comme  $\lambda < K_0$ , il vient que:  $\frac{1}{\lambda} > \frac{1}{K_0}$ . La force mesurée est donc plus petite que la force "réelle" (théorique) si l'on suppose un éther polarisable.

Poincaré introduit, après ces considérations, la condition qui permet de retrouver les conséquences de la théorie de Maxwell. Nous devons poser dans ce but, dit-il,  $\lambda = 0$ . En conséquence il faut faire, d'après l'équation (3),  $\epsilon = 1$  de façon à ce que  $K$  ait une valeur finie. Poincaré donne alors la "signification physique" de cette condition en terme de la théorie des cellules. Elle traduit le fait "... que les parties conductrices occupent la totalité du volume du diélectrique. Cela revient à se représenter les diélectriques — continue Poincaré — comme des cellules conductrices séparées par des cloisons isolantes d'épaisseur infiniment petite par rapport aux dimensions de ces cellules". Il ajoute toutefois dans une note à ce passage: "Ceci ne doit pas être pris à la lettre. Il serait difficile d'admettre que le vide eût une semblable constitution. Il ne faut voir là qu'une façon d'exprimer ce fait que, dans le diélectrique, l'électricité ne circule pas, ne se déplace pas, il y a seulement polarisation"<sup>94</sup>

Dans la théorie de Maxwell, considérée comme un cas particulier de la théorie de Helmholtz, la répulsion "réelle" entre deux charges électriques placées dans le vide serait alors infinie, la force mesurée restant finie.

La Condition de Passage à l'Electrostatique de Maxwell

Le potentiel électrostatique  $\varphi$  comprend, dans la théorie de Helmholtz, les effets dûs à la distribution de l'électricité libre dans les conducteurs, et à l'électricité dans les diélectriques résultant de la polarisation de ceux-ci. Soit  $\sigma$  la densité électrique dans un point  $(x, y, z)$  d'un conducteur,  $(f, g, h)$  les composantes de la polarisation diélectrique. Le potentiel électrostatique est donné par :

$$\varphi = \frac{1}{\lambda} \int \frac{\sigma d\tau}{r} + \frac{1}{\lambda} \int \left( f \frac{d^4/r}{dx} + g \frac{d^4/r}{dy} + h \frac{d^4/r}{dz} \right) d\tau ,$$

où la première intégrale s'étend sur la région occupée par les corps conducteurs et la deuxième sur les corps diélectriques. La deuxième intégrale peut être décomposée en deux intégrales, l'une sur la surface des diélectriques, et l'autre sur le volume de ceux-ci :

$$\int \left( f \frac{d^4/r}{dx} + g \frac{d^4/r}{dy} + h \frac{d^4/r}{dz} \right) d\tau = \int (lf + mg + nh) d\omega - \int \left( \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} \right) d\tau ,$$

(l, m, n) étant les cosinus directeurs de la normale à chaque point de la surface.

L'électricité dans les conducteurs est, en général, distribuée sur la surface de ceux-ci, mais Poincaré suppose, par souci de généralité, que la première intégrale de l'équation (5) peut aussi être décomposée dans une intégrale de volume et une intégrale de surface sur les conducteurs.

Appelons  $\rho$  la densité volumétrique de charge et  $[\rho]$  la densité superficielle de charge. L'une comme l'autre sont supposées comprendre l'électricité "libre" et l'électricité de polarisation. Nous avons alors, par référence aux notations employées dans les équations (5) et (6) :

$$\rho = \sigma \quad (\text{dans les conducteurs})$$

$$\rho = - \left( \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} \right) \quad (\text{dans les diélectriques})$$

$$[P] = [\sigma] + lf + mg + nh \quad (\text{\`a la surface de s\'eparation}$$

des conducteurs et des di\'electriques).<sup>95</sup>

Avec ces nouvelles notations on peut \`ecrire l'\`equation (5) :

$$\lambda \varphi = \int \rho \frac{dx}{r} + \int \frac{[P]d\omega}{r}, \quad (7)$$

o\`u la premi\`ere int\'egrale est d\'efinie sur les volumes des conducteurs et des di\'electriques, et la deuxi\`eme sur les surfaces qui s\'eparent ces deux milieux.

La distribution  $[P]$  est donc la somme de l'\`electricit\'e "libre" sur les surfaces des conducteurs et de l'\`electricit\'e "fictive" sur les surfaces des di\'electriques, due \`a la polarisation de ceux-ci.<sup>96</sup>

Dans la th\'eorie de Helmholtz on a alors \`a l'int\'erieur d'un di\'electrique :

$$\frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = -\rho \quad (8)$$

Dans cette th\'eorie l'\`electricit\'e ne se comporte pas comme un fluide incompressible, puisque en prenant la d\'eriv\'ee par rapport au temps des deux membres de cette \`equation il vient :

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = -\frac{d\rho}{dt}, \quad (9)$$

o\`u  $(u, v, w) \equiv (\dot{f}, \dot{g}, \dot{h})$  peut \`etre interpr\'et\'e comme un courant de d\'eplacement dans cette th\'eorie.

L'\`equation de Poisson s'\`ecrit, pour un point int\'erieur aux di\'electriques :

$$\lambda \Delta \varphi = -4\pi \rho \quad (10)$$

A l'int\'erieur des corps conducteurs  $\varphi$  est, \`evidemment, constant.

On peut \`egalement \`ecrire, pour un point situ\'e \`a l'int\'erieur du di\'electrique et proche infiniment de la surface de s\'eparation de celui-ci avec le conducteur (en se rappelant que  $\varphi = \frac{c\sigma}{4\pi}$  dans les conducteurs):

$$\lambda \frac{d\varphi}{dn} = -4\pi [P] \quad (11)$$

Mais comme  $[P]$  comprend aussi l'\`electricit\'e de polarisation

l'équation (4) permet d'obtenir<sup>97</sup>

$$K \frac{d\varphi}{dn} = -4\pi [\sigma] \quad (1)$$

où  $[\sigma]$  est, comme auparavant, la densité superficielle d'électricité libre sur la surface des conducteurs.

Examinons maintenant les implications de la condition  $\lambda \rightarrow 0$  sur le formalisme de l'électrostatique de Helmholtz.

L'énergie électrostatique  $U$  peut être obtenue en calculant le travail nécessaire pour polariser le milieu diélectrique. Cette énergie et le potentiel électrostatique  $\varphi$ , sont liés par l'équation :

$$U = \int \frac{d\tau K}{8\pi} \left[ \left( \frac{d\varphi}{dx} \right)^2 + \left( \frac{d\varphi}{dy} \right)^2 + \left( \frac{d\varphi}{dz} \right)^2 \right], \quad (13)$$

et **ne dépend** donc pas de  $\lambda$ , mais uniquement de  $K$ , comme nous avons déjà remarqué auparavant.

L'électricité libre des conducteurs, c'est à dire les densités  $\rho$  et  $[\rho]$ , ne dépendent évidemment pas des propriétés de polarisation du diélectrique, et donc pas de  $\lambda$  (voir équation (12)).

Par contre les densités  $\rho$  et  $[\rho]$  tendent vers zero quand on fait  $\lambda$  tendre vers zero, d'après les équations (10) et (11). En se rappelant de la définition de  $[\rho]$ , la condition  $\lambda \rightarrow 0$  conduit donc à la conséquence que la densité de l'électricité fictive sur la surface des diélectriques, équivalente à la polarisation de ceux-ci, acquiert dans cette limite la même valeur absolue que la densité de l'électricité libre sur la surface des conducteurs.

L'équation (8), à son tour, deviendra :

$$\frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0 \quad (14)$$

Dans l'état permanent des courants, en supposant que toute force électromotrice est d'origine électrostatique, l'équation (4) deviendra l'équation de Maxwell entre la force et le déplacement électrique, si l'on fait tendre  $\lambda$  vers zero :

$$\frac{4\pi f}{K} = - \frac{d\varphi}{dx} \quad (15)$$

Comparaison des démarches des volumes I et II de *Electricité*  
et *Optique* relatives au passage de la *Théorie de Poisson-*  
*Mossotti* à l'*Electrostatique* de *Maxwell*

Avant d'aborder l'électrodynamique nous voudrions rapprocher la démarche de Poincaré dans ce chapitre, de celle du chapitre III du vol. I, analysée dans la section 3. A cette occasion nous avons signalé notre intention de déceler si dans le vol. II — qui contient des leçons données après l'expérience de Hertz de 1888 — la comparaison qu'entreprend Poincaré des théories de Maxwell et de Helmholtz suit la même perspective épistémologique de la comparaison du vol. I entre la théorie du fluide inducteur et la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti. Essayons d'apporter des éléments à ce sujet.

Une première différence que se révèle entre les deux démarches concerne le rôle de l'expérience. Dans la modification des hypothèses de base de la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti, entreprise dans le vol. I, Poincaré visait accorder la "classe de conséquences" de cette théorie à celle de la théorie du fluide inducteur. Sa démarche a été inter-théorique et "l'instance" expérimentale n'est pas intervenue. En particulier Poincaré n'y a pas mis en évidence le fait que les conséquences électrostatiques testables de la théorie ne sont pas affectées par la valeur attribuée à  $K_1$  ( $\lambda$  dans le vol. II), dès qu'on attribue une valeur convenable à un autre paramètre de la théorie.

Nous avons discuté dans la section 3 ce qui était implicite au passage de la théorie de Poisson-Mossotti à la théorie des cellules: la polarisabilité du vide. De toute évidence Poincaré n'était pas concerné par les conséquences électrostatiques de cette nouvelle propriété du vide, comme, par exemple, la dualité qui s'introduit entre une valeur mesurée de la force Coulombienne et une valeur "réelle" (théorique).

Pourtant, Poincaré savait sans doute que seulement la grandeur  $K$  (le pouvoir inducteur spécifique) rentre en ligne de compte au niveau

empirique, puisqu'il y obtient, également, l'expression de l'énergie électrostatique (exp. 20), qui est indépendante de  $K_1$  et de  $h$ . La limite  $K_1 \rightarrow 0$  ne suppose donc que des aménagements théoriques n'ayant pas de conséquences empiriques en électrostatique.

Nous pouvons donc voir que le "passage" accompli dans le vol. I, se prêtait ainsi admirablement au but épistémologique qui y était pour - suivi : montrer que deux théories différentes du point de vue de leurs hypothèses de base, peuvent, néanmoins, s'accorder; ce qui renforçait la thèse de Poincaré selon laquelle on ne doit pas chercher dans la théorie physique le reflet d'une "réalité objective". En effet, Poincaré n'y était pas contraint à faire des remarques sur des éventuelles implications empiriques de son exercice de rapprochement inter-théorique.

Nous suggérons que l'expérience de Hertz de 1888 a été responsable de cette mise en valeur de "l'instance" expérimentale dans les considérations de Poincaré sur le "passage" de l'électrostatique de Helmholtz à l'électrostatique de Maxwell dans le vol. II de Electricité et Optique. En fait nous verrons plus bas que seulement avec l'expérience de Hertz s'ouvre la possibilité de tester les conséquences de la limite  $K_1 \rightarrow 0$ , touchant les phénomènes électromagnétiques. Poincaré pouvait donc, avant cette expérience, se livrer à une simple comparaison des deux électrostatiques sans avoir égard à l'expérience.

Une deuxième différence concerne l'interprétation physique des grandeurs  $K_1$  (vol. I) et  $\lambda$  (vol. II). La première a reçu, dès le départ, la signification de "pouvoir inducteur spécifique de la substance isolante qui sépare les cellules conductrices". Dans le vol. I le "support ontologique était essentiel à la construction de la théorie. Par exemple, l'expression (20) de l'énergie électrostatique y a été obtenue à partir d'un certain nombre d'hypothèses concernant l'interaction entre les cellules du milieu. Pour étudier cette interaction Poincaré a dû faire appel à une analogie entre le phénomène de propagation de la chaleur dans un milieu homogène et le déplacement d'électricité dans les cellules.<sup>98</sup>

Dans le vol. II la théorie des cellules ne joue plus aucun rôle dans la construction théorique, ni dans l'interprétation des grandeurs. L'équation fondamentale de la théorie des diélectriques est obtenue par

analogie avec la théorie du magnétisme par influence, et non pas à partir d'hypothèses sur la constitution de ces milieux. Il est significatif que Poincaré ne fasse ressortir nulle part, dans le vol. II, l'interprétation "physique" de la grandeur  $\lambda$ .

Nous relevons aussi que seulement dans le vol. II Poincaré compare les conséquences des théories de Helmholtz et de Maxwell, en ce qui concerne les distributions de charge à la surface de séparation des conducteurs et des diélectriques. L'absence de cette discussion dans le vol. I nous semble remarquable, vue son importance chez Mathieu, Duhem et Hertz.

Une quatrième différence concerne le fait que, dans le vol. II, la théorie de la polarisation diélectrique se situe à l'intérieur d'une structure théorique plus large qui comprendra également l'électrodynamique: la théorie de Helmholtz. Dans le vol. I la comparaison était restreinte à l'électrostatique. Nous verrons, par la suite, que la condition  $\lambda \rightarrow 0$  a des implications électrodynamiques et électromagnétiques testables. Cette condition assurera également le "passage" d'une théorie à l'autre dans ces deux domaines, et de cette façon affirmera la prééminence de l'électrostatique dans ce passage chez Poincaré. Cet aspect, mis en évidence par un commentateur français<sup>99</sup> de Maxwell, vient en appuie de l'importance que nous avons accordé, dans ce travail, aux développements du chapitre III vol. I de Electricité et Optique.

Certaines des différences que nous venons de signaler témoignent d'un changement des déterminations épistémologiques (implicites ou explicites) de la comparaison des deux théories effectuée dans le vol. II de Electricité et Optique, probablement en conséquence du nouveau contexte historique.

Ainsi, Poincaré montre dans le vol. II, d'une façon apparemment analogue aux développements du chapitre III, vol. I, qu'on peut accorder certaines conséquences de la théorie de Helmholtz à celles de la théorie

de Maxwell. Ces deux théories ne seront pas, pour autant, considérées comme équivalentes ou également acceptables. Non seulement Poincaré cherchera à trancher, sur une base empirique, en faveur de l'une des deux théories, mais il montrera également, qu'elles peuvent être distinguées par l'application d'un critère théorique: le "principe de l'unité de la force électrique".

Nous voudrions, néanmoins, souligner l'absence, dans la comparaison qu'il mène de ces deux théories, de toute réflexion au sujet de l'hypothèse adoptée par chaque électrostatique concernant le mode de transmission de l'action électrique. Dans le vol. I on pourrait encore voir, dans les hypothèses ontologiques de la théorie de Poisson-Mossotti et, ensuite, dans la théorie des cellules, des références implicites à une hypothèse d'action à distance. Paradoxalement, dans le vol. II le "passage" d'une électrostatique à l'autre masque cette problématique. Poincaré a, dans ce sens, une attitude beaucoup plus formaliste dans le vol. II, quand on pourrait attendre le contraire à la suite de l'expérience de Hertz de 1888.<sup>100</sup>

Nous croyons que Poincaré n'engage une discussion sur ce qui, pour lui, est de l'ordre des fondements physiques des théories de Helmholtz et de Maxwell, que dans le chapitre sur "l'unité de la force électrique". Nous verrons, effectivement, qu'il sera alors question du statut des champs électrique et magnétique et, implicitement, des théories de la transmission de l'action.

Revenons pour le moment à la comparaison qui entreprend Poincaré des théories de Helmholtz et de Maxwell.

### L ' E l e c t r o d y n a m i q u e

Poincaré examine après l'électrostatique, si la valeur attribuée à  $\lambda$  affecte les conséquences électrodynamiques de la théorie de Helmholtz. Ces conséquences sont associées au terme  $dF/dt$  de l'équa -

tion (4). Dans l'état permanent ce terme est nul, et on revient à l'électrostatique. Pour les courants variables ce terme est négligeable, sauf dans le cas où la variation du courant est très rapide (comme dans les expériences de Hertz). Cette constatation est le fondement de la thèse, chez Poincaré, que la théorie de Maxwell est un "cas limite" de la théorie de Helmholtz, et non pas un cas particulier, comme affirmait ce dernier :

"Il faut pour passer de l'une à l'autre, attribuer à  $\lambda$  une valeur infiniment petite".<sup>101</sup>

Effectivement, l'influence du paramètre  $\lambda$  ne se fera sentir qu'à partir du moment où  $dF/dt$  sera très grand, ce qui introduit une différence entre les conditions  $\lambda = 0$  et  $\lambda \rightarrow 0$ , tant qu'il n'est question que d'accorder les conséquences de la théorie de Helmholtz aux résultats expérimentaux. Dans le premier cas, la théorie de Maxwell est considérée un cas particulier de la théorie de Helmholtz. Dans le deuxième cas elle n'en est qu'un cas limite.<sup>102</sup>

### La Propagation des Perturbations Electromagnétiques

Les équations fondamentales de la théorie de Helmholtz, qu'obtient Poincaré avec l'introduction de son paramètre  $\lambda$ , et en utilisant les notations de Maxwell, sont (nous écrivons seulement la première des composantes) :

$$\frac{4\pi f}{k-\lambda} = -\frac{d\varphi}{dx} - \frac{dF}{dt}, \text{ etc.} \quad (16)$$

$$4\pi\mu = \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} + \lambda \frac{d^2\varphi}{dx dt}, \text{ etc.} \quad (17)$$

$$a = \mu\alpha = \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz}, \text{ etc.} \quad (18)$$

$$J = \frac{dF}{dx} + \frac{dG}{dy} + \frac{dH}{dz} = -\kappa\lambda \frac{d\varphi}{dt} \quad (19)$$

où  $(\alpha, \beta, \gamma)$  sont les composantes de la force magnétique;  $(u, v, w)$  sont les composantes du courant électrique total;  $(F, G, H)$  les composantes de l'état électrotonique;  $(a, b, c)$  les composantes de l'induction magnétique;  $\mu$  est le coefficient d'induction magnétique; et les autres grandeurs gardent la même signification qu'auparavant.

A partir de ces équations on peut obtenir les équations d'une perturbation électromagnétique transversale et d'une perturbation électromagnétique longitudinale (voir Appendice B).<sup>103</sup>

La vitesse de propagation d'une onde plane longitudinale sera donnée par :

$$V_L = \sqrt{\frac{K}{(\kappa - \lambda)\kappa\lambda}}, \quad (20)$$

où  $K$  est le pouvoir inducteur du milieu,  $\kappa$  le paramètre de Helmholtz et  $\lambda$  le paramètre de Poincaré.

La vitesse de propagation d'une onde plane transversale sera :

$$V_T = \sqrt{\frac{1}{\mu(\kappa - \lambda)}}. \quad (21)$$

La théorie de Maxwell ne prévoit pas d'onde électromagnétique longitudinale. Poincaré montre alors que la perturbation longitudinale prévue par la théorie de Helmholtz, peut être éliminée en posant une quelconque des trois conditions :

$$\kappa = 0$$

$$\lambda = 0$$

$$K = \lambda$$

Chacune de ces conditions implique, effectivement, le résultat :

$$V_L = \infty$$

La condition  $K = \lambda$  élimine, en plus, la perturbation transversale. Poincaré remarque que cette condition caractérise la théorie de Mossotti, où la valeur du pouvoir inducteur du vide était considérée égale à  $\lambda$ . Dans cette théorie il n'y donc a pas de propagation d'onde longitudinale ou d'onde transversale dans le vide, puisque ce milieu n'est pas capable de se polariser.

La théorie de Maxwell prévoit, par contre, que des ondes transversales se propagent dans le vide avec la vitesse ( $c$ ) de la lumière. L'expérience permet de déterminer la valeur du pouvoir inducteur et du coefficient d'induction magnétique. Dans le système électromagnétique d'unités, qu'adoptent Maxwell et Poincaré,  $K_0 = c^{-2}$  et  $\mu_0 = 1$ . Dans le vide, la vitesse de propagation des ondes transversales selon la théorie de Helmholtz est donc :

$$V_T = \sqrt{\frac{1}{c^2 - \lambda}}$$

Le résultat prévu par la théorie de Maxwell s'obtient en posant,  
 $\lambda = 0$

Les équations de (16) à (19) de la théorie de Helmholtz deviennent dans ce cas :

$$\frac{4\pi f}{K} = - \frac{d\varphi}{dx} - \frac{dF}{dt}, \text{ etc.} \quad (16')$$

$$4\pi u = \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz}, \text{ etc.} \quad (17')$$

$$a = \mu \alpha = \frac{dH}{dx} - \frac{dG}{dz}, \text{ etc.} \quad (18')$$

$$J = \frac{dF}{dx} + \frac{dG}{dy} + \frac{dH}{dz} = 0 \quad (19')$$

Ces équations sont exactement celles qu'écrivit Maxwell.

Des équations (17') il s'ensuit la condition d'incompressibilité de l'électricité :

$$\frac{du}{dx} + \frac{d\sigma}{dy} + \frac{d\omega}{dz} = 0 \quad (22)$$

Donc, en faisant  $\lambda = 0$  la théorie de Helmholtz conduit au résultat de la théorie de Maxwell exprimé par la proposition: "tous les courants sont fermés".

On peut aussi déduire des équations (9) et (22) que :

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad , \quad (23)$$

c'est-à-dire que  $\rho$  est toujours invariable. "Si  $\rho = 0$  à l'origine – affirme Poincaré – la densité VRAIE de l'électricité est toujours nulle"<sup>104</sup>

Poincaré met en évidence que la condition  $\lambda = 0$  est donc suffisante pour "passer" de la théorie de Helmholtz à celle de Maxwell, et que le paramètre  $\kappa$  peut donc être laissé indéterminé.<sup>105</sup>

Ce résultat remet en cause les conditions qu'avait posées Helmholtz en 1870 pour passer de sa théorie à celle de Maxwell. Il avait alors posé trois conditions indépendantes :

$$\kappa = 0 \quad , \quad \epsilon \rightarrow \infty \quad , \quad \nu \rightarrow \infty$$

où, avec sa notation,  $\kappa$  est le paramètre de Helmholtz,  $\epsilon$  la constante de polarisation diélectrique et  $\nu$  la constante de polarisation magnétique (voir Appendice B).<sup>106</sup>

La condition  $\lambda = 0$  de Poincaré correspond à la condition  $\epsilon \rightarrow \infty$  de Helmholtz, d'après l'équation (3). Cette seule condition est en fait suffisante pour retrouver les résultats de la théorie de Maxwell, selon Poincaré. Ce savant souligne le caractère nécessaire de ce résultat:

"Il n'est pas étonnant qu'on n'ait pas à donner à  $\kappa$  une valeur particulière pour faire rentrer la théorie de Maxwell dans celle de Helmholtz: Maxwell ne considère que des courants fermés,  $\kappa$  doit donc toujours disparaître des équations".<sup>107</sup>

Nous avons, en effet, mis en évidence dans l'Appendice B, que le potentiel électrodynamique total d'un courant, obtenu par intégration tout au long d'un circuit fermé, est effectivement indépendant du paramètre  $\kappa$ .

Les Théories de Helmholtz et de Maxwell et l'Expérience

Poincaré présente les chapitres de VII à XII du vol. II de l'ouvrage Electricité et Optique, comme une tentative d'application des principes des théories électrodynamiques rivales (...)

"... à la discussion des expériences de Hertz en cherchant si ces expériences ne peuvent pas nous permettre de décider entre les diverses théories en présence".<sup>108</sup>

Poincaré est conscient du caractère provisoire de cette partie de son ouvrage, "destinée à vieillir rapidement", mais il y attache une grande importance.<sup>109</sup> Ce qui nous intéresse ici est l'attitude de Poincaré dans cette confrontation théorie/expérience.

Les théories électrodynamiques rivales sont d'abord classées à travers les valeurs que prend le paramètre  $\lambda$ . Ainsi nous avons :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \lambda = \kappa_0 & \text{(théories de Weber et de Neumann)} \\ \lambda = 0 & \text{(théorie de Maxwell)} \\ 0 < \lambda < \kappa_0 & \text{(théories "intermédiaires") } \end{array} \right.$$

L'expérience de Hertz de 1888 a eu comme conséquence, selon Poincaré, de rejeter définitivement les théories pour lesquelles vaut la condition  $\lambda = \kappa_0$ . Effectivement, ces théories ne sont pas capables de rendre compte de la propagation de perturbations électromagnétiques dans l'air (ou le vide).

Poincaré sera concerné, donc, essentiellement par les deux autres alternatives. Parmi les "théories intermédiaires" il place la théorie de Helmholtz.

Toutefois, l'expérience ne permet pas à Poincaré, en 1891, de rejeter la théorie de Helmholtz d'une façon décisive, et de corroborer la

théorie de Maxwell.<sup>110</sup> Son bilan final, au terme d'une longue discussion des données expérimentales disponibles, est le suivant :

"La théorie est incomplète, les expériences sont peu nombreuses et contradictoires. Il est donc impossible de décider s'il y a accord ou désaccord. Je termine encore par un point d'interrogation. Toutefois, s'il m'est défendu de conclure, je puis parler de l'impression que me causent les plus récents progrès de la science (...) que l'ensemble des résultats est plus favorable aujourd'hui à la théorie de Maxwell qu'il y a quelques mois au moment où j'ai clos mon cours".<sup>111</sup>

En dépit de cela, dans l'ouvrage Electricité et Optique Poincaré donne sa préférence à la théorie de Maxwell, tout en signalant ses difficultés. Nous étudierons, par la suite, le fondement de ce choix qui n'est donc pas de nature empirique.

Le "Principe de l'Unité de la Force Electrique" et le choix en faveur de la Théorie de Maxwell

La préférence que Poincaré accorde à la théorie de Maxwell s'asseyait non pas sur l'expérience, mais sur le "principe de l'unité de la force électrique". Ce choix a vraisemblablement précédé toute considération d'ordre expérimental<sup>112</sup>

Poincaré attribue à Hertz la formulation de ce principe, dans une comparaison que ce savant entreprend en 1884, des théories électrodynamiques "opposées".<sup>113</sup>

Nous attribuons aux discussions qui suivent non seulement un intérêt historique, mais surtout un intérêt épistémologique. Est en jeu, effectivement, le poids relatif de l'expérience et des "principes" dans l'évaluation des théories.

Dans une réflexion sur le rôle de l'hypothèse en physique mathématique,<sup>114</sup> Poincaré fait une distinction entre "les différentes sortes

d'hypothèses". Dans la première catégorie il range les hypothèses "naturelles", qui "sont les dernières que l'on doit abandonner", parmi lesquelles figurent les "conditions imposées par la symétrie".

Dans la discussion sur le "principe de l'unité de la force électrique" nous décelons l'importance, justement, des arguments de symétrie.

Ce n'est pas tout, cependant. Ce principe, avec celui analogue de "l'unité de la force magnétique", se réfère à la question de l'autonomie des "champs" électrique et magnétique, vis à vis de leurs sources. Cette question est naturellement associée à des hypothèses sur la transmission de l'action.

Le point de départ des réflexions de Poincaré est la symétrie entre grandeurs électriques et magnétiques, qui ressort de la forme donnée par Hertz aux équations de Maxwell. Dans cette formulation on peut écrire le système d'équations :

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{4\pi\mu} \left( \frac{dc}{dy} - \frac{db}{dz} \right), \text{ etc.} \quad (\text{I})$$

où (f, g, h) sont les composantes du déplacement électrique et (a, b, c) les composantes de l'induction magnétique.<sup>115</sup>

Ces grandeurs sont, également, liées par les équations :

$$\frac{da}{dt} = -\frac{4\pi}{K} \left( \frac{dh}{dy} - \frac{dg}{dz} \right), \text{ etc.} \quad (\text{II})$$

Une simple permutation permet de passer d'une de ces équations à l'autre. D'autre part, les composantes du déplacement électrique et les composantes de la force magnétique satisfont à une condition solénoïdale:

$$\begin{aligned} \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} &= 0 \\ \frac{da}{dx} + \frac{db}{dy} + \frac{dc}{dz} &= 0 \end{aligned}$$

Cette symétrie, mise en évidence par Hertz, conduit Poincaré à chercher des analogues, en magnétisme, aux effets dus aux courants de conduction ou de convection. On peut s'attendre, dit-il, à ce que des phénomènes électriques se produisent en conséquence d'un "courant magnétique".

Ce "courant magnétique" peut être engendré par le mouvement d'un pôle magnétique, ou par un solénoïde traversé par un courant électrique qui varie d'une façon continue. Un "courant magnétique" fermé peut être mis en place par un solénoïde fermé, parcouru par un courant électrique qui, par exemple, diminue de façon continue.

On sait qu'un courant électrique fermé équivaut — quant à ses effets magnétiques — à un certain "feuillet magnétique"<sup>116</sup> ayant le circuit comme contour.

Le "principe de l'unité de la force magnétique" exprime l'hypothèse que l'interaction de deux courants électriques fermés est identique à l'interaction des feuillets magnétiques équivalents à ces courants. Poincaré signale que ce principe ne découle pas immédiatement de l'équivalence d'un courant électrique fermé et d'un feuillet magnétique. En fait, ce principe suppose qu'on attribue au champ magnétique une certaine "autonomie" (le mot n'est pas utilisé par Poincaré) et il peut être formulé, donc, de la façon suivante :

"La force magnétique en un point étant donnée en grandeur et en direction, son origine importe peu; la connaissance du champ magnétique suffit à déterminer ce qui s'y passe, indépendamment de la cause qui le produit".<sup>117</sup>

La réciprocité signalée plus haut entre le déplacement électrique et la force magnétique — qui s'attache aux équations de Maxwell — conduit Poincaré, à la suite de Hertz, à formuler un "principe de l'unité de la force électrique":

"Nous admettons pour l'électricité un principe analogue à celui que tout le monde admet pour le magnétisme. Un aimant en forme d'anneau dont le magnétisme varie, ou, ce qui revient au même, un solénoïde fermé parcouru par un courant variable, équivaut à un feuillet électrique de puissance convenable, au point de vue du champ électrique auquel il donne naissance. Il agira donc comme ce feuillet sur un autre feuillet électrique; et, en vertu du principe de l'action et de la réaction, subira de la part de ce second feuillet une réaction égale et contraire à l'action exercée. Ainsi un solénoïde crée un champ électrique, deux solénoïdes fermés variables exercent l'un sur l'autre une action mécanique

identique à celle qu'exercent deux feuillets électriques équivalents. Tel est le principe de "l'unité de la force électrique". 118

Le statut de ce "principe" est, pour Poincaré, celui d'une "hypothèse". Il suppose, en effet, que la force électrique, calculée par la variation du potentiel vecteur (F, G, H), puisse être assimilée à une force électrostatique ordinaire. A l'époque où Poincaré écrivait ses leçons, cette hypothèse n'avait pas de base expérimentale.<sup>119</sup>

Poincaré applique les équations de l'électrodynamique de Helmholtz au calcul de l'interaction de deux solénoïdes fermés d'une part, et de l'interaction de deux feuillets électriques équivalents à ces solénoïdes d'autre part. Il montre que la force électromotrice n'est la même dans ces deux cas, que pour  $\lambda = 0$ . Nous avons vu que cette condition est celle qui permet d'accorder les conséquences de la théorie de Helmholtz à celles de la théorie de Maxwell. Poincaré conclut:

"La théorie de Maxwell est donc seule compatible avec le principe de l'unité de la force électrique". 120

Dans une note ajoutée au deuxième volume de Electricité et Optique, Poincaré considère le cas plus compliqué de l'interaction entre un solénoïde fermé et un feuillet électrique. Il montre que la théorie de Helmholtz conduit à des résultats contradictoires pour cette interaction, soit qu'on considère le solénoïde comme fixe et le feuillet comme mobile, soit le contraire:

"On est ainsi conduit à conclure que les hypothèses fondamentales de la théorie de Helmholtz sont incompatibles avec l'égalité de l'action et de la réaction". 121

La théorie de Maxwell, par contre, ne présente pas cette difficulté.

Dans un article bien postérieur — "A propos des expériences de M. Crémieu" (1901) — Poincaré réaffirme la différence essentielle entre l'électrodynamique de Maxwell d'une part, et les électrodynamiques de Helmholtz et d'Ampère d'autre part, en ce qui concerne la possibilité de définir un "champ magnétique". En se référant à ces deux dernières électrodynamiques il affirme :

"Dans l'une comme dans l'autre, le mot de champ magnétique n'a pas de sens, ou, si on lui en donne un par une convention plus ou moins artificielle, les lois ordinaires, si familières à tous les électriciens, ne s'appliquent plus; c'est ainsi que la force électromotrice induite dans un fil n'est plus mesurée par le nombre des lignes de force rencontrées par ce fil".

Cette question — souligne Poincaré — ne concerne pas uniquement des "habitudes invétérées de langage et de pensée", associées à l'usage généralisé du concept de "ligne de force". Elle se rapporte à l'adoption d'une théorie sur le mode de transmission de l'action :

"Si nous ne croyons pas aux actions à distance, il faut expliquer les phénomènes électrodynamiques par une modification du milieu. C'est précisément cette modification que l'on appelle le champ magnétique, et alors les effets électrodynamiques ne devraient dépendre que de ce champ".

Cette "difficulté" des électrodynamiques d'Ampère et de Helmholtz est liée, selon Poincaré, à l'existence de courants électriques ouverts dans ces deux théories. L'introduction "AD HOC" des courants de polarisation par Helmholtz n'a pas répondu, d'une façon entièrement satisfaisante selon lui, à ces objections.<sup>122</sup>

SECTION V.5- APERCU DES OPTIONS THEORIQUES DE POINCARÉ  
APRES 1890

Il est important pour nos objectifs de donner un aperçu de la façon dont Poincaré développe quelques uns des thèmes soulevés dans ses leçons de 1888 et 1890, et de comment s'enrichit, de son point de vue, la problématique dans les domaines de l'électrodynamique et de l'optique. Nous verrons ainsi, que l'influence de l'épistémologie de Poincaré sur l'orientation de ses recherches se dégage toujours d'une manière très nette.

La divergence que nous constatons entre les "programmes" de Poincaré et de Duhem dans ces domaines de recherches ne pourra être comprise, en effet, que par référence à l'épistémologie singulière élaborée par chacun de ces savants.

Durant les leçons données à la Sorbonne pendant le premier trimestre de l'année 1892/3, Poincaré donne suite à ses tentatives d'interprétation des résultats expérimentaux portant sur les "oscillations électriques".<sup>123</sup> Comme nous l'avons signalé dans la section précédente, il considérait comme provisoire son étude des expériences de Hertz, du vol. II de l'ouvrage Electricité et Optique.

Nous décelons des modifications majeures dans cette nouvelle étude. Celle qui nous concerne particulièrement est l'adoption par Poincaré de la forme que Hertz a donnée à la théorie de Maxwell dans son mémoire de 1890: "On the fundamental equations of electromagnetics for

bodies at rest". Poincaré donne la préférence à cette formulation de Hertz, prouvant par là qu'il a été sensible à la critique des "fondements logiques" du Treatise de Maxwell, menée dans ce mémoire. Hertz y élabore une théorie en supprimant ce qu'il considère comme des "idées rudimentaires" de Maxwell, parmi lesquelles figure celle d'un "déplacement électrique":

"Among such rudimentary ideas of a physical nature I may mention that of dielectric displacement in free ether, as distinguished from the electric force which produces it and the relation between the two – the specific inductive capacity of the ether. These distinctions have a meaning so long as we can remove the ether from a space and yet allow the force to persist in it. This was conceivable, according to the conception from which Maxwell started; it is not conceivable, according to the conception to which we have been led by his researches".

A la suite de cela, Hertz va éliminer, des équations fondamentales, la grandeur "déplacement électrique", et il la remplacera par la grandeur "force électrique". Il va aussi éliminer le "vecteur potentiel", qu'il classifie comme une "idée rudimentaire d'une nature mathématique".<sup>124</sup>

Dans son ouvrage Les Oscillations Electriques Poincaré commence par exposer les conceptions de Hertz sur l'existence de représentations équivalentes de la théorie de Maxwell:

"Maxwell, avant de publier son grand et célèbre traité, avait écrit quelques ouvrages dans lesquels on trouve des idées qu'il a répudiées plus tard. Mais, même dans son ouvrage principal, on rencontre plusieurs théories peu conciliables. Hertz considère que le fond même des idées de Maxwell se trouve dans les équations qu'il obtient et qu'une théorie peut être regardée comme équivalente à celle de Maxwell, pourvu qu'elle conduise aux mêmes équations. Ainsi, la théorie de Helmholtz contient, comme cas particulier, celle de Maxwell, et cependant Maxwell n'aurait pas admis cette interprétation, dans laquelle les actions à distance jouent encore un rôle".<sup>125</sup>

Poincaré fait donc sienne l'analyse de Hertz sur la présence dans le Treatise de résidus des mémoires antérieurs de Maxwell, ce qui

expliquerait l'existence dans cet ouvrage de conceptions inconciliables, notamment en ce qui concerne le "mot électricité".

Poincaré résume, également, les quatre points de vue dans lesquels on peut se placer par rapport à la transmission de l'action électrique, exposés par Hertz dans l'introduction de son recueil de 1892: Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft.<sup>126</sup> Le quatrième point de vue est celui qui traduit d'une façon cohérente, selon Hertz, la conception de Maxwell d'une action contigüe transmise par un milieu. Poincaré remarque à la suite de Hertz, que le Treatise ne se présente pas comme un ouvrage tout à fait en harmonie avec ce point de vue. Le statut de la charge électrique y serait particulièrement révélateur d'une inconsistance interne à ce travail.

Poincaré va donc adopter le quatrième point de vue et l'électrodynamique de Hertz, qui en est la traduction. Il souligne, toutefois, la spécificité de sa démarche, par rapport à celle de Hertz, dans la construction de cette théorie :

"Nous ne suivrons pas tout à fait l'ordre de Hertz: Hertz pose ses équations, puis montre qu'elles ne sont en contradiction avec aucun fait; ici nous partirons des faits expérimentaux connus avant Hertz et, avec quelques hypothèses, nous arriverons aux équations. Cela aura l'avantage de montrer quelles hypothèses il faut faire".<sup>127</sup>

Nous verrons dans le prochain chapitre l'importance de cette décision méthodologique, face aux objections que Duhem va soulever à la formulation Hertzienne de la théorie de Maxwell.

Parmi les "hypothèses" fondamentales que Poincaré adopte, figurent celles de l'unité de la force électrique et de l'unité de la force magnétique, qu'il avait déjà analysées dans l'ouvrage Electricité et Optique.

C'est donc à partir de la "représentation" Hertzienne de la théorie de Maxwell que Poincaré va entreprendre en 1892, l'interprétation des expériences sur la propagation des oscillations électriques dans les conducteurs et dans les diélectriques. Il ne fera plus aucune référence à l'électrodynamique de Helmholtz, ni aux conditions de passage de celle-ci à la théorie de Maxwell. En effet, le champ théorique de l'ouvrage

Electricité et Optique semble déjà dépassé, et Poincaré s'engagera dans la discussion des nouvelles électrodynamiques des corps en mouvement.<sup>128</sup>

### L'Elargissement du Champ Théorique

Dès 1895 nous voyons Poincaré engagé dans une analyse élargie des théories du "champ" électromagnétique pour des corps en repos et en mouvement, ainsi que des diverses théories de la lumière. Dans une série d'articles publiés dans la revue L'Eclairage Electrique, sous le titre "A Propos de la théorie de M. Larmor", Poincaré se penche sur les "interprétations théoriques" des faits expérimentaux en Optique: les théories éther-élastiques de la lumière de Fresnel et de Neumann; l'éther gyrostatique de W. Thomson; la "théorie dynamique du milieu électrique et lumineuse" de Larmor. Il étudie, également, les électrodynamiques des corps en mouvement de Helmholtz, Hertz, et Lorentz.<sup>129</sup>

Nous sommes concernés ici notamment par l'attitude de Poincaré face à ces nombreuses alternatives théoriques.

Poincaré commence par soulever la différence entre les théories de la lumière de Fresnel et de Neumann. La première suppose que les vibrations d'une molécule de l'éther lumineuse se font perpendiculairement au plan de polarisation, tandis que d'après la deuxième théorie ces vibrations sont parallèles à ce plan. Ces deux théories — moyennant des hypothèses particulières sur l'élasticité et la densité de l'éther — expliquent le même ensemble de faits expérimentaux. En particulier elles conduisent à des équations de l'énergie emmagasinée dans l'éther, ayant la même forme. Seules changent, selon la théorie adoptée, les définitions des grandeurs qui figurent dans ces équations.

Poincaré montre comment la théorie de Fresnel suppose, dans le cadre d'une théorie mécanique de la lumière, que l'élasticité du milieu

luminifère est analogue à l'élasticité des solides. Les hypothèses particulières de la théorie de Neumann, sur l'élasticité variable de l'éther dans des milieux différents, sont expliquées par contre en supposant, comme W. Thomson, que l'élasticité de l'éther est de type rotationnel. Dans la théorie de W. Thomson l'élasticité de l'éther est due au mouvement rotationnel de toupies microscopiques, qui tendent à conserver l'orientation de leurs axes dans l'espace.

Poincaré montre que la principale différence entre une théorie qui suppose l'élasticité de l'éther comme analogue à celle d'un solide et la théorie de W. Thomson, concerne la forme que prend l'énergie emmagasinée dans ce milieu. Ainsi, dans la dernière théorie, l'éther ne saurait posséder que de l'énergie cinétique. Les forces "réelles" à l'origine de l'élasticité selon la première théorie, sont considérées comme des forces "fictives" dans la dernière. Poincaré conclut :

"On peut donc se demander si l'éther n'est pas constitué de la sorte; si un observateur, disposant de moyens assez puissants pour pénétrer toutes les délicatesses de sa structure intime, ne découvrirait pas que toute son énergie est due à la force vive des tourbillons infinitésimaux qui y sont renfermés. Son élasticité, que la théorie ordinaire explique par des attractions à distance s'exerçant entre les molécules, serait due alors à de simples forces apparentes d'inertie, analogues dans une certaine mesure à la force centrifuge".<sup>130</sup>

Poincaré montre qu'en fait, la théorie mécanique de l'éther de W. Thomson peut s'appliquer aussi bien à la théorie de Fresnel qu'à la théorie de Neumann. Il suffirait de donner une définition adéquate des grandeurs qui apparaissent dans chaque théorie.

Ensuite, Poincaré met en évidence l'analogie entre les lois expérimentales des phénomènes lumineux et les lois des phénomènes électromagnétiques :

"Maxwell a le premier remarqué cette analogie et ce sera son éternel titre de gloire".<sup>131</sup>

Poincaré éclaire alors le passage de l'analogie à l'explication dans le cadre d'une théorie mécanique de la lumière :

"L'identité de la lumière et de l'électricité semble hors de doute d'après ces considérations que des expériences ont confirmées et on y a d'abord cherché une explication nouvelle des phénomènes optiques destinée à faire oublier les anciennes explications mécaniques.

Puis on a cherché une explication mécanique commune de la lumière et de l'électricité, et alors l'idée la plus naturelle était de revenir aux théories élastiques dont j'ai parlé plus haut et qui avaient si longtemps paru tout à fait satisfaisantes. Puisqu'elles rendaient compte de la lumière, il s'agissait de les adapter à l'explication de l'électricité. L'adaptation aurait été immédiate, si les équations de l'électricité n'étaient comme nous venons de le voir, plus générales que celles de l'optique".<sup>132</sup>

Poincaré montre, néanmoins, qu'on peut interpréter les équations de l'électromagnétisme à partir des hypothèses de la théorie de Fresnel ou de celles de la théorie de Neumann. Cette interprétation conduirait alors à attribuer des nouvelles propriétés à l'éther:

"Dans l'un et l'autre cas, on est conduit à attribuer à l'éther des propriétés assez étranges et faites pour nous surprendre au premier abord. Il convient en tout cas d'insister sur ces étrangetés, soit qu'on veuille familiariser les esprits avec elles, soit qu'on les regarde comme des obstacles insurmontables qui ne permettent pas d'adopter ces explications".<sup>133</sup>

Poincaré met en évidence par la suite, les conséquences de cette interprétation dans l'hypothèse de l'éther de Fresnel, et comment les sphères pulsantes de Bjerknes pourraient accorder une certaine plausibilité aux "étrangetés" qui en découlent.

La théorie de Larmor peut être considérée, de ce point de vue, comme une "adaptation" de la théorie de Neumann au formalisme de l'électromagnétisme.

Poincaré aborde, dans la suite de son article, l'électrodynamique des corps en mouvement, dont l'étude lui semble essentielle pour éclairer

les questions soulevées. Il considère les théories de Hertz, de Helmholtz et de Lorentz, de l'électrodynamique des corps en mouvement.

Poincaré signale que les équations auxquelles est arrivé Hertz en 1890 demandent une modification, puisqu'elles supposent que l'éther est complètement entraîné par la matière en mouvement, ce qui est incompatible avec les expériences de Fizeau (qui ont montré que l'entraînement est partiel).<sup>134</sup> L'électrodynamique de Hertz serait, néanmoins, la seule compatible avec deux principes fondamentaux: celui de la conservation de l'électricité et celui de l'égalité de l'action et de la réaction.

L'électrodynamique des corps en mouvement proposée par Helmholtz est, selon Poincaré, incompatible avec le principe de conservation de l'électricité.<sup>135</sup>

Poincaré montre que l'électrodynamique de Lorentz est la seule qui s'accorde aussi bien avec l'hypothèse d'un entraînement partiel de l'éther, qu'avec le principe de conservation de l'électricité. Toutefois, sa difficulté résiderait dans son incompatibilité avec le principe de l'égalité de l'action et de la réaction.<sup>136</sup>

Le résultat de l'expérience de Fizeau et ces deux principes sont, pour Poincaré, "les conditions auxquelles il semble que devrait satisfaire toute théorie électrodynamique des corps en mouvement".<sup>137</sup>

Nous avons vu qu'aucune des théories examinées ne satisfait simultanément à ces trois conditions. Ce fait l'invite à une réflexion sur le "statut" de ces trois principes :

"On peut se demander si cela tient à ce que ces théories sont incomplètes ou si ces trois conditions ne sont réellement pas compatibles, ou ne le deviendraient que par une modification profonde des hypothèses admises".<sup>137</sup>

En dépit de cette question fondamentale, Poincaré soutient qu'il faut faire un choix en faveur d'une de ces trois théories :

"Nous ne pourrions par conséquent espérer d'échapper à cette difficulté qu'en modifiant profondément les idées générale - ment admises; on ne voit pas bien d'ailleurs, dans quel sens

cette modification devrait se faire.  
 Il faut donc renoncer à développer une théorie parfaitement satisfaisante et s'en tenir provisoirement à la moins défectueuse qui paraît celle de Lorentz".<sup>138</sup>

Toutefois il affirme, plus loin, en rapport avec la difficulté qu'il signale dans la théorie de Lorentz :

"Il faudra donc un jour ou l'autre modifier nos idées en quelque point important et briser le cadre où nous cherchons à faire rentrer à la fois les phénomènes optiques et les phénomènes électriques".<sup>139</sup>

Ce cadre s'avèrera être celui de la Mécanique, mais Poincaré n'en a pas encore une nette conscience en 1895. Néanmoins il discute déjà, dans cet article, les résultats négatifs des expériences de Michelson et d'autres pour déceler "le mouvement absolu de la matière, ou mieux le mouvement relatif de la matière pondérable par rapport à l'éther...".<sup>140</sup> Est en jeu dans cet article l'adoption d'un "principe du mouvement relatif" selon lequel uniquement le mouvement relatif des corps pondérables est considérée observable, et non pas le mouvement de ces corps par rapport à l'éther. Ce principe est l'embryon de ce que Poincaré appellera plus tard le "principe de la relativité".. Il affirme, en effet, plus loin,

"... l'impossibilité de mettre en évidence un mouvement relatif de la matière par rapport à l'éther, et l'égalité qui a sans doute lieu entre l'action et la réaction sans tenir compte de l'action de la matière sur l'éther, sont deux faits dont la connexité semble évidente.  
 Peut-être les deux lacunes seront-elles comblées en même temps".<sup>140</sup>

En 1895 Poincaré est donc déjà engagé dans la solution des problèmes qui seront à l'origine des théories successives de l'électron de Lorentz — programme auquel il a apporté des contributions majeures.

On peut être tenté de rapporter, retrospectivement, certains des thèmes traités par Poincaré dans l'article de 1895, à une revision des fondements de la Mécanique et, donc, le placer aux origines de la théorie de la relativité restreinte. La perspective de Poincaré était, cependant, toute autre, et s'affirmera de façon de plus en plus nette par la suite, jusqu'à son mémoire de 1905: "Sur la dynamique de l'électron".

Ces recherches de Poincaré ont été, en effet, marquées par une hiérarchisation des domaines de la Physique, la Mécanique y occupant une place privilégiée. Ainsi, les lois de la Mécanique acquièrent, au fur et à mesure, le "statut" privilégié de conventions, échappant de cette façon au verdict expérimental. Certains auteurs situent, ainsi, les conceptions de Poincaré dans une "vision mécaniste du monde".<sup>141</sup> Evidemment cette "vision" chez Poincaré ne peut pas être assimilée à celle qui prône la réduction de tous les domaines de la physique à la Mécanique. Nous croyons que ce travail a suffisamment montré que Poincaré s'y opposait radicalement. Son engagement dans le programme de Lorentz montre également, qu'il a été plutôt proche d'adopter une "vision électromagnétique de la nature" où, au contraire, on assigne à l'électromagnétisme la tâche d'expliquer les phénomènes physiques. N'empêche que l'hiérarchisation à laquelle nous avons fait allusion plus haut, reste un trait essentiel de son épistémologie.

Une autre évidence de cette "vision mécaniste" chez Poincaré est sa croyance dans l'existence d'un éther assurant un repère absolu, même si le mouvement par rapport à ce repère s'averait inobservable.

A ce propos les différents "status" du principe de relativité chez Poincaré d'un côté, et chez Einstein de l'autre côté, a été remarqué par plusieurs spécialistes.<sup>142</sup> Poincaré attendait que ce principe trouve son fondement, ou son explication, dans une théorie physique. En plus, une expérience pourrait éventuellement remettre en cause sa validité. Chez Einstein, par contre, le principe de relativité a le statut d'un postulat, et il est indépendant de l'adoption d'une théorie électrodynamique particulière.<sup>143</sup>

Aujourd'hui on est à la mesure de saisir la différence entre l'approche de Lorentz et de Poincaré d'un côté, et de celle qui a été à

l'origine de la théorie de la relativité restreinte de l'autre côté. Einstein a dû instituer un nouveau rapport entre les domaines de la Mécanique et de l'Electromagnétisme, brisant toute hiérarchie entre eux, pour parvenir à sa théorie.

En réalité, les problèmes que Lorentz et Poincaré essayaient de résoudre, ne se poseront pas à Einstein. Dans cette perspective, le "programme" des deux premiers savants avait une grande cohérence, qui ne peut pas être perçue si l'on se place dans le cadre des recherches d'Einstein. Comme il a été dit d'une façon très pertinente :

"Poincaré and Lorentz made a valiant effort to save classical physics in the light of new phenomena, when most of their contemporaries were not aware that classical physics was in serious difficulties".<sup>144</sup>

L'épistémologie de Poincaré, qualifiée souvent de "conventionaliste" et "empiriste"<sup>145</sup>, a joué un rôle essentiel dans l'attachement de ce savant au programme de Lorentz et dans la façon dont il a abordé les "anomalies" qui se présentaient à la physique de l'époque.

Du point de vu de notre travail, cette épistémologie se manifeste, dans l'article de 1895, d'abord par la façon dont Poincaré y discute et compare une multitude de théories fondées sur des hypothèses complètement différentes. Par ailleurs cette attitude, que nous qualifions de "pluraliste" par opposition à un monisme théorique, est présente dans toute son oeuvre. Nous la décelons ainsi, dans son ouvrage Théorie mathématique de la lumière, où il expose et compare les nombreuses théories éther-élastiques de la lumière.

Dans l'ouvrage Electricité et Optique Poincaré traite, d'une façon semblable, de multiples théories électrodynamiques. Cette attitude pluraliste se révèle, également, dans la discussion qui y est menée de la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell. Poincaré ne s'empêchera pas alors, de faire appel aux théories éther-élastiques de la lumière pour essayer de résoudre la question — laissée en ouvert par le savant écossais — de l'angle entre le plan de polarisation de la lumière et celui de la perturbation magnétique ou celui de la perturbation électrique.<sup>146</sup>

En deuxième lieu, nous voudrions souligner ici le rôle assigné par Poincaré aux "principes" en tant que des critères permettant de faire le "tri" des théories qui se disputent dans un certain domaine. quand l'expérience, dans son rôle irremplaçable d'"instance" ultime de jugement, fait défaut.

Nous avons vu que dans l'article de 1895 Poincaré juge les théories de Helmholtz, Hertz et Lorentz, et finit par adopter la dernière, sur la base de quelques principes auxquels toute théorie électrodynamique des corps en mouvement doit, selon lui, satisfaire. Certains de ces principes vont acquérir, plus tard, aux yeux de Poincaré, le statut de conventions.<sup>147</sup>

Dans ce travail nous avons également mis en évidence l'usage que fait Poincaré des principes d'unité de la force électrique et d'unité de la force magnétique, dans la confrontation des théories de Helmholtz et de Maxwell.

L'étude que nous allons entreprendre, dans le prochain chapitre, de la réception des théories de Maxwell dans l'oeuvre de Pierre Duhem, nous aidera à faire ressortir d'une façon encore plus nette l'influence que les considérations épistémologiques ont eu sur le physicien Poincaré.

Nous devons justifier, dans le cadre d'un travail consacré essentiellement à la réception des théories de Maxwell, la place que nous accordons à l'oeuvre en électricité et magnétisme d'un savant comme P. Duhem. Dans le présent chapitre nous allons discuter des écrits de ce savant publiés entre 1885 et 1916.

Pendant cette période les progrès accomplis dans ce domaine, ayant comme origine les recherches de Maxwell, a été immense. Il y a eu le développement de la théorie électromagnétique de la lumière sur plusieurs fronts, dont celui ouvert par Lorentz — sa théorie de l'électron — s'est montré très puissant du point de vue heuristique. L'électrodynamique des corps en mouvement, qui avait été à peine touchée par Maxwell, a fait l'objet de nombreuses recherches depuis Hertz. Nous avons fait référence, dans le chapitre précédent, aux contributions capitales de Poincaré à ce programme. Dans ses conséquences les plus radicales, ces recherches, menées selon l'approche de Lorentz, ont conduit à une "vision" électromagnétique de la nature", où on a voulu placer l'électromagnétisme, et non plus la mécanique comme jusqu'alors, à la base de l'édifice de la physique. Les tentatives de théories mécaniques de l'électricité et du magnétisme se sont aussi succédées, avec FitzGerald, Lodge, W. Thomson, Boltzmann, Larmor, etc. . Le point en commun de toutes ces recherches était la supposition de l'existence d'un milieu universel: l'éther. La crise ouverte par la non réductibilité de chacun des deux domaines — l'électromagnétisme et la mécanique — l'un à l'autre, n'a pu être résolue qu'avec la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. L'éther s'est donc averé une "hypothèse non nécessaire", comme a déclaré ce savant à l'introduction du fameux mémoire de 1905 .

Ces développements débordent largement les limites thématiques de ce travail.

Nous verrons dans ce chapitre que les mémoires et ouvrages de

Duhem, quoique contemporains à ces développements, ne sont pas concernés directement par eux. Ce savant va travailler dans un programme marginal par rapport à ceux cités plus haut.

Duhem va partir de l'électrodynamique de Helmholtz et ses recherches seront menées dans le but d'approfondir cette théorie et de l'appliquer à l'interprétation des expériences réalisées dans ce domaine. Duhem s'est refusé, en fait, à prendre comme point de départ de ses recherches les acquis de l'entreprise Maxwellienne.

Il a été donc un cas à part. D'où l'intérêt que nous portons à comprendre ses choix et son cheminement théorique.

Nous divisons ce chapitre en deux grandes parties, l'une consacrée aux textes de Duhem de caractère essentiellement scientifique, et l'autre aux textes de caractère notamment historiographique et épistémologique. Cette division ne presuppose pas l'existence d'un clivage absolu entre les deux champs. Au contraire, une des conclusions à laquelle nous serons conduits à partir de ces analyses, concernera l'impossibilité de dissocier chez Duhem, ses recherches en tant que scientifique, de ses conceptions sur l'histoire et la philosophie des sciences.

## PREMIERE PARTIE

### MAXWELL DANS LES ECRITS EPISTEMOLOGIQUES ET HISTORIOGRAPHIQUES

#### DE PIERRE DUHEM

##### Section VI.I - Maxwell comme un enjeu dans les premières reflexions epistemologiques de Duhem

Duhem expose déjà les principales conceptions de son épistémologie dans un article publié en 1892: "Quelques réflexions au sujet

## C H A P I T R E VI

### LE CAS DUHEM DANS LA RECEPTION DES THEORIES DE MAXWELL EN FRANCE

-----

#### Prémière Partie

#### Maxwell dans les Ecrits Epistémologiques et Historiographiques de Pierre Duhem

SECTION VI.1- MAXWELL COMME UN ENJEU DANS LES PREMIERES REFLEXIONS EPISTEMOLOGIQUES DE DUHEM	p.225
SECTION VI.2- LES THEORIES DE L'OPTIQUE ET LA CONCEPTION DUHEMIENNE DE L'HISTOIRE DES SCIENCES	p.230
SECTION VI.3- MAXWELL, LES EXPLICATIONS MECANIQUES ET L'"ECOLE ANGLAISE"	p.237
- Les Théories Mécaniques dans deux Traditions de Recherches	p.238
- Les "Modèles Algébriques"	p.241
- Modèles Mécaniques et Modèles Algébriques	p.243
- Modèles et Heuristique	p.244
SECTION VI.4- DISCUSSION DES ANALYSES DE DUHEM SUR LA PHYSIQUE ANGLAISE DE LA DEUXIEME MOITIE DU XIX <sup>ème</sup> SIECLE	p.246
- Aspects Méthodologiques de l'Oeuvre de Maxwell en Électricité et en Magnétisme	p.247
- Lectures de l'Oeuvre de Maxwell chez Duhem et Poincaré	p.253

SECTION VI.5- LES THEORIES DE MAXWELL ET L'EVOLUTION DE LA MECANIQUE p.257

- Le Concept de Force et l'Evolution de la Mécanique p.260

Deuxième Partie

Duhem, la Critique des Théories de Maxwell et le Programme de Helmholtz

SECTION VI.6- LA CRITIQUE DE 1894 DES THEORIES DE MAXWELL p.268

- Charges "Réelle" et "Fictive" chez Faraday et chez Maxwell p.270

- Le Problème du Condensateur et les "Idées" de Faraday et de Maxwell p.272

- Discussion des Développements de Duhem sur le Problème du Condensateur p.274

- Le Problème de la Loi de Coulomb et les "Idées" de Faraday et de Maxwell p.275

- L'Electrodynamique de Helmholtz et les "Idées" de Faraday et de Maxwell p.277

- Le Caractère Contradictoire de la Théorie de Maxwell selon Duhem p.280

- La Modification de la Théorie de Helmholtz p.283

- Résumé du Mémoire de 1894 p.285

SECTION VI.7- LA THEORIE DE HELMHOLTZ ET L'EXPERIENCE p.286

- Les Tentatives d'obtenir une Théorie Electromagnétique de la Lumière p.289

SECTION VI.8- L'OUVRAGE LES THEORIES ELECTRIQUES DE J. C. MAXWELL p.296

- Les Electrostatiques de Maxwell p.299

- La Grandeur "Déplacement Electrique" dans les Mémoires de Maxwell p.302

- La Grandeur "Electricité Libre" dans les Mémoires de Maxwell p.305

- L'Equation entre la Force Electromotrice et le Déplacement Electrique chez Maxwell	p.308
- La Contradiction de la "Deuxième Electrostatique" de Maxwell	p.310
- La "Troisième Electrostatique" de Maxwell	p.312
- Discussion des Analyses Précédentes	p.314
- Duhem et la Grandeur "Flux de Déplacement" chez Maxwell	p.318
- La Condition d'Uniformité des Flux de Conduction et de Déplacement dans le Mémoire " On Physical Lines of Force"	p.322
- La Condition d'Uniformité des Flux de Conduction et de Déplacement dans le Mémoire " A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field"	p.326
- Les Discontinuités entre le Deuxième et le Troisième Mémoires de Maxwell	p.328
- La Théorie Electromagnétique de la Lumière dans l'Ouvrage de 1902	p.331
- Le Choix en Faveur de la Théorie de Helmholtz	p.332

SECTION VI.9- QUELQUES CONSIDERATIONS SUR LE CAS DUHEM DANS LA RECEPTION DES THEORIES DE MAXWELL p.334

- Le Développement de l'Electrodynamique de Helmholtz	p.340
- Duhem et l'Electrodynamique de Hertz	p.342
- Duhem et la Théorie des Electrons	p.345

des théories physiques". Il est capital de signaler que cet article reproduit les Leçons d'ouverture de son Cours de Physique Mathématique et de Cristallographie à la Faculté des Sciences de Lille, ce qui révèle l'importance des rapports intimes entre ses conceptions épistémologiques, ses recherches en physique et son enseignement.

Les théories de Maxwell en électricité et magnétisme sont évoquées dans cet article associées à deux sujets centraux qu'y sont abordés: le statut des théories mécaniques et les critères qui permettent de choisir parmi différentes théories physiques traitant de la même classe de phénomènes.

D'après Duhem le "but" d'une théorie physique est simplement de classer, de coordonner un "grand nombre" de lois expérimentales relatives à un domaine circonscrit de phénomènes. Elle n'a pas pour but de fournir une "explication métaphysique du monde matériel", de déceler "la nature des choses matérielles", de donner "la raison d'être des lois qui régissent les phénomènes que nous observons".<sup>1</sup>

La conception Duhemienne du "but" d'une théorie physique repose sur une analyse des procédés par lesquels on l'établit: la définition des grandeurs et le choix des hypothèses.

La définition est selon lui une correspondance conventionnelle entre une grandeur et une "notion physique". La métaphore du dictionnaire donne une illustration de ce procédé. Duhem souligne qu'il n'y a pas un rapport de nature entre une grandeur et une notion physique. La grandeur n'est qu'un symbole de celle-ci, qui permet de traduire en langage mathématique les lois expérimentales formulées en langage ordinaire.

Les hypothèses seraient des relations entre les grandeurs. Elles peuvent être plus ou moins "proches" des lois expérimentales. Duhem soutient qu'on n'arrive jamais à formuler une théorie physique idéale, où toutes les hypothèses seraient des traductions symboliques des lois expérimentales. Les hypothèses sont toujours, d'après lui, obtenues par un procédé de généralisation à partir des lois expérimentales.

La théorie physique atteint son but de coordination et d'économie quand, à partir de ses hypothèses, on arrive par la déduction à des conséquences en accord — dans les limites de la précision expérimentale — avec "un ensemble étendu de lois physiques" dans un domaine de —

limité de phénomènes.

Il va de soi que, pour Duhem, une théorie physique "poussée assez loin", entraînera toujours des conséquences incompatibles avec l'expérience; d'où l'importance de fixer les limites de son application.

Les "théories mécaniques" sont, d'après Duhem, le résultat d'un "faux idéal" assigné à la physique théorique, caractérisé par la recherche d'explications en termes uniquement de masse et de mouvement. Cet idéal mécaniste est non seulement illusoire aux yeux de Duhem, mais aussi illégitime, dans la mesure où il conduit à contraindre les procédés par lesquels on crée des théories :

"Nous avons vu qu'à chaque notion physique, la théorie devait substituer, à titre de symbole, une certaine grandeur; que cette grandeur était astreinte à présenter certaines propriétés, traduction immédiate des caractères de la notion qu'elle symbolise; mais qu'à part ces caractères, en général peu nombreux, sa définition demeurerait absolument arbitraire. Dans une théorie mécanique, on impose en outre à toutes les grandeurs physiques, sur lesquelles portent les lois que l'on va avoir à relier entre elles, la condition d'être composées au moyen des éléments géométriques et mécaniques d'un certain système fictif; à toutes les hypothèses, d'être l'énoncé des propriétés dynamiques de ce système".<sup>2</sup>

Selon les "écoles mécaniques", des exigences additionnelles concernant la nature du "système matériel" seraient posées :

"Pour les uns, le système matériel doit être formé de milieux continus; pour les autres, d'atomes isolés; les uns admettent entre les divers éléments matériels des forces attractives ou répulsives; d'autres rejettent l'existence de semblables forces et veulent que les atomes matériels puissent agir seulement au contact conformément aux lois du choc".<sup>3</sup>

Pour Duhem un premier inconvénient des théories mécaniques est donc celui d'imposer trop d'exigences à la construction théorique, ce qui, pour lui, conduit invariablement à compliquer celle-ci, de façon à "répondre à toutes les exigences de l'expérience ...".

Les exigences mécanistes conduiraient également à éloigner les hypothèses des lois expérimentales et, en conséquence, rendre la théorie physique plus vulnérable au jugement expérimental.

Duhem utilise comme illustration une analogie avec deux dessinateurs, dont un serait libre d'employer toutes les ressources de son art dans le but de représenter un objet, tandis que l'autre serait contraint à n'utiliser que des traits :

"Le premier, par le jeu des ombres, pourra, sur une seule épure, nous donner de l'objet une représentation que le second égalera à grand'peine en dessinant un grand nombre de profils. Le premier artiste est l'image du physicien qui compose un théorie physique, le second, du physicien qui construit une théorie mécanique. Que l'on examine la complication des milieux imaginés par sir W. Thomson pour rendre compte des lois de l'optique, par Maxwell pour représenter les phénomènes électriques, et l'on comprendra la justesse de cette comparaison".<sup>4</sup>

La première référence à Maxwell dans les écrits épistémologiques de Duhem concerne donc la tentative de ce savant, datée de 1861/2, d'explication des phénomènes électriques et magnétiques à partir de la théorie des vortex moléculaires. Nous relevons également l'association entre Maxwell et W. Thomson, qui reviendra plusieurs fois chez Duhem.

La deuxième référence à Maxwell dans l'article de Duhem de 1892, se situe dans le contexte d'une critique adressée à Poincaré.

Duhem reproche à celui-ci son instrumentalisme (le terme n'est pas employé par Duhem), révélé par son acceptation de théories différentes qui se rapportent aux mêmes phénomènes. Il cite comme exemple l'ouvrage THEORIE MECANIQUE DE L'ELECTRICITE, où Poincaré soutient que, dans le domaine de l'Optique, on trouve des théories différentes mais "également plausibles". Duhem conteste :

"Dans ces lignes, nous croyons pressentir une tendance qui régné, en notre temps, dans tous les domaines intellectuels et qui commence à imposer son empire même à la Physique Mathématique: cette tendance consiste à regarder comme équivalentes les différentes théories que l'on peut

donner d'un même ensemble de lois, et à les étudier toutes sans accorder de préférence à aucune d'entre elles".<sup>5</sup>

Duhem met en garde contre la tendance à nier l'existence de critères pour choisir parmi des théories physiques distinctes d'une même classe de phénomènes.

Cette tendance pourrait sembler compatible, dit-il, avec la conception du but de la théorie physique qu'il défend dans cet article. Poincaré, qu'il présente comme épousant cette même conception, serait tombé dans ce piège.

Duhem insiste que les critères permettant un choix existent. Il fait référence, ainsi, au critère logique, au critère expérimental.

Il met en évidence également ceux qui se rapportent à " l'étendue" de la théorie, au nombre d'hypothèses admises et à la nature de ces hypothèses.

Poincaré serait particulièrement complaisant dans l'application du critère logique. Cela se révèle, pour Duhem, notamment par rapport aux théories de Maxwell en électricité et magnétisme . Ainsi, dans l'ouvrage ELECTRICITE ET OPTIQUE Poincaré aurait démontré l'existence d'inconsistances dans l'électrostatique du Treatise, ce qui ne l'a pas empêché de l'adopter. Duhem considère intolérable la présence de contradictions logiques dans une théorie physique :

"... une théorie illogique n'est pas un mystère devant lequel la raison puisse s'incliner; elle est une absurdité que la raison doit rejeter sans pitié; peu importe qu'elle soit due à un grand physicien; une idée puissante peut être fausse, admirons l'auteur et condamnons l'idée".<sup>6</sup>

Accepter le Treatise de Maxwell serait porter atteinte à ces principes :

"... dans ce traité Maxwell développe plusieurs théories différentes, inconciliables entre elles, parfois même, comme sa théorie des pressions à l'intérieur des diélectriques, contradictoires avec les principes les mieux assis de l'Hydrostatique et de l'Elasticité; il ne se préoccupe pas d'expliquer ces contradictions, de séparer le domaine

de chacune de ces théories; il les mêle au contraire et les enchevêtre, les débrouiller devient une tâche tellement difficile qu'un illustre analyste ne la regarde pas comme indigne de ses efforts; à toute cette oeuvre manque un contrôle expérimental précis; parfois même les faits lui donnent tort".<sup>7</sup>

Duhem semble encore contester la préférence que donne Poincaré aux théories de Maxwell quand il souligne que les théories physiques n'ont pas pour but de "découvrir de nouvelles lois". La "méthode expérimentale" aurait, pour Duhem, à son compte, la "plupart des découvertes expérimentales".

Poincaré admirait, effectivement, la théorie de Maxwell pour sa fécondité, dont la découverte de nouvelles lois serait un indicateur. Duhem ne voit là que les "preuves de la fécondité d'une méthode donnant au delà de ce qu'on doit exiger d'elle".<sup>8</sup>

Dès très tôt, l'oeuvre de Maxwell en électricité et magnétisme est donc prise comme exemple dans les réflexions de Duhem sur l'objet et la structure de la théorie physique. Nous retrouverons cette référence et ce contexte dans chacun des écrits de Duhem qui seront traités dans la première partie de ce chapitre. Nous verrons qu'un enjeu épistémologique si important, étant donnée sa permanence tout au long de l'oeuvre de Duhem, se rattache à un enjeu scientifique qui prend place aussi dès cette époque. Les théories de Maxwell constitueront effectivement, un relais entre deux champs du travail théorique Duhemien. La critique épistémologique ira de pair avec la critique scientifique.

#### SECTION VI.2- LES THEORIES DE L'OPTIQUE ET LA CONCEPTION DUHEMIENNE DE L'HISTOIRE DES SCIENCES

Les théories de Maxwell font ensuite l'objet des considérations de Duhem dans l'article "Les théories de l'Optique" , publié en 1894.

Dans cet article, fort intéressant à plusieurs égards, Duhem trace l'histoire des théories en optique jusqu'à la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell, en passant par une discussion des théories éther-élastiques de la lumière.

Il consacre une large place à la théorie de Fresnel et son succès à expliquer plusieurs phénomènes auxquels s'était butée la théorie emissionniste qui, au début du XIX siècle, était soutenue en France par Laplace et ses disciples.

Duhem montre que l'adhésion à l'approche de Fresnel n'a pas levé les doutes au sujet de l'hypothèse selon laquelle les vibrations des parties de l'éther dans la lumière polarisée sont normales au plan de polarisation. Les théories de Mac Cullagh et de F.- E. Neumann admettaient, au contraire, que ces vibrations étaient dans le plan de polarisation. Il a fallu attendre les expériences d'Otto Wiener, réalisées en 1891, pour qu'un choix entre ces théories puisse être fait. Ces expériences ont montré, selon Duhem, que "si l'on convient de mesurer l'intensité de la lumière, en un point d'un espace éclairé, par la force vive moyenne de la molécule d'éther qui vibre autour de ce point (...) la vibration d'un rayon polarisé ne peut être située dans le plan de polarisation". Ce résultat a conduit à rejeter les théories de Mac Cullagh et de Neumann.

L'analyse que fait Duhem du rapport entre l'expérience et la théorie physique, dans ce cas particulier, nous intéresse particulièrement car elle fait appel à ses conceptions épistémologiques :

"Ce que condamne l'expérience de M. O. Wiener, ce n'est pas l'hypothèse particulière que la vibration est parallèle au plan de polarisation; ce qu'elle condamne, c'est l'ensemble des hypothèses qui constituent la théorie de Mac Cullagh et Neumann; elle nous apprend que cet ensemble est en désaccord avec les faits; elle nous contraint d'en abandonner quelque chose, mais elle ne nous dit pas ce qu'il y faut changer; nous pouvons, par exemple, renoncer à mettre la trajectoire de la molécule étherée dans le plan de polarisation du rayon; mais nous pouvons aussi laisser la molécule étherée vibrer dans le plan de polarisation, pourvu que nous changions quelque autre hypothèse à la théorie, par exemple l'hypothèse qui précise le sens mécanique attribué à l'intensité lumineuse; c'est ce qu'a

si bien montré M. H. Poincaré.

Ce n'est pas là, du reste, une particularité de l'expérience réalisée par M. O. Wiener; c'est un caractère général de la méthode expérimentale; il n'est jamais possible de soumettre au contrôle de l'expérience une hypothèse isolée, mais seulement l'ensemble des hypothèses — et, en général, elles sont immombrables — qui constituent une théorie; si l'expérience contredit aux prévisions du théoricien, jamais elle ne condamne nommément une de ses hypothèses, mais seulement le système entier de ses suppositions; elle lui enjoint de changer quelque chose à ce système; elle ne lui dit pas ce qu'il faut changer; en un mot, l'experimentum crucis, tel que l' imagine la philosophie baconienne, est impossible en physique ..."<sup>9</sup>

Nous avons voulu citer ce texte in extenso, parce qu'il présente, probablement pour la première fois<sup>10</sup>, une idée qui sera considérée parmi les plus originales de l'épistémologie Duhemienne. Nous verrons d'ailleurs l'usage qu'il va en faire dans ses recherches sur l'électrodynamique de Helmholtz, face aux résultats des expériences de Hertz et d'autres sur la propagation des perturbations électromagnétiques.

Il faut remarquer particulièrement, pour donner suite à l'étude de de l'article de 1894, les considérations de Duhem sur les "théories mécaniques" proposées en Optique dans la tradition inaugurée par Fresnel. Elles supposaient la théorie des petits mouvements dans un milieu fluide ou solide. Duhem fait référence à Lamé qui espérait obtenir, à partir de l'étude des mouvements du "fluide éthéré", l'explication des phénomènes optiques, voire le lien caché entre plusieurs ordres de phénomènes.<sup>11</sup>

Duhem fait état des difficultés auxquelles s'est heurté ce programme de théories mécaniques en Optique et les efforts accomplis, par l'introduction de nouvelles hypothèses, en vue de les surmonter. Il cite, notamment, les théories dûes à Cauchy, Briot, Boussinesq, Sarrau et Helmholtz, dont certaines avaient introduit l'hypothèse d'une interaction entre l'éther et la matière.<sup>12</sup>

Les considérations de Duhem sur ce sujet sont révélatrices de la crédibilité dont ce programme était investi à l'époque où il écrit son article :

" A quels résultats certains cette mêlée d'idées aura-t-elle conduit les physiciens? Il est difficile de le dire; au fort de la bataille il est malaisé de désigner le vainqueur et de prédire les conséquences de la victoire".<sup>13</sup>

Dans le début de la section suivante, où Duhem introduira la théorie électromagnétique de la lumière, il ajoute :

"Aussi bien, une idée nouvelle a surgi qui, peut-être, rendra vaines toutes ces luttes et portera ailleurs le terrain de la guerre; cette idée est issue du progrès des théories électriques".<sup>14</sup>

Duhem expose les principales étapes de ce développement, en commençant par la découverte de Faraday des propriétés diélectriques des corps isolants. L'hypothèse que l'éther lui-même est polarisable verra, par la suite, le jour dans les théories électriques.

Duhem montre comment Maxwell, s'appuyant alors sur les conceptions de Faraday, a introduit l'hypothèse que les changements dans l'état de polarisation des diélectriques pourraient être assimilés à des courants, qu'il a appelé "de déplacement" :

"Aucune expérience ne renseignait Maxwell sur les propriétés des courants de déplacement; pour découvrir ces propriétés, il n'était guidé que par le sentiment d'une analogie, incomplète d'ailleurs, entre ces courants et les courants électriques ordinaires, qu'il nommait courants de conduction ; il usa si heureusement de ce guide que, sans jamais recourir au contrôle de l'expérience, il parvint à constituer de toutes pièces, à côté de l'électrodynamique des courants de conduction, l'électrodynamique des courants de déplacement".<sup>15</sup>

Par l'intermédiaire de cette hypothèse Maxwell arrive, finalement, en faisant appel aux expériences de Weber et Kohlrausch "à ce résultat surprenant — continue Duhem — que de nouvelles mesures et de nouveaux calculs n'ont cessé de confirmer: la vitesse de propagation des courants de déplacement dans l'air est égale à la vitesse de la lumière dans le même milieu".<sup>16</sup>

Duhem souligne, cependant, que Maxwell, comme Fresnel, "inventait mieux qu'il ne savait justifier ses inventions", et que ses raisonnements "reservent plus d'une pénible surprise à l'esprit amoureux de la clarté et soucieux de la rigueur ...".

Duhem remarque que le résultat de l'expérience de Hertz aurait pu être interprété simplement comme une "coïncidence fortuite" : l'égalité de deux vitesses. De là à affirmer "que la lumière consiste en courants de déplacement variant périodiquement avec une extrême rapidité, il y a un abîme logique — dit-il; cet abîme Maxwell l'a franchi d'un bond, et il a créé ainsi la théorie électromagnétique de la lumière".<sup>17</sup>

Cette théorie — continue Duhem — a finalement gagné la faveur des physiciens, malgré "l'obscurité et la confusion des principes sur lesquels elle repose ...". Les exigences logiques auxquelles étaient soumises les théories de "l'Ecole française" — et, ici, Duhem cite, non sans ironie, des extraits de la préface de l'ouvrage Electricité et Optique de Poincaré — "semblent, exagérées à beaucoup de physiciens". Il ajoute :

"... plusieurs même les trouvent un peu ridicules, et, avant la précision et la logique, qui ne satisfont que la raison, font passer la généralité des aperçus et l'imprévu des rapprochements qui séduisent l'imagination; aussi fait-on grâce à la théorie électromagnétique de l'obscurité de ses origines; on lui demande seulement d'être féconde en applications".

Duhem ne nie pas, d'ailleurs, que la théorie électromagnétique de la lumière appliquée aux phénomènes optiques "rend compte, plus aisément peut-être" de ceux-ci que la théorie éther-élastique. Il signale, dans ce contexte, les efforts de plusieurs physiciens — parmi lesquels il cite Poincaré — qui cherchent "dans leurs spéculations sur la lumière, de tenir la balance égale entre les vibrations et les courants de déplacement".<sup>18</sup> Autrement dit, ils s'efforçaient de trouver un compromis entre la théorie éther-élastique et la théorie électromagnétique de la lumière.<sup>19</sup>

Duhem soutient que ces deux théories sont, du point de vue adopté par leurs auteurs, des théories mécaniques de la lumière. La théorie électromagnétique de la lumière serait également le produit d'une physique "pénétrée jusqu'aux moelles d'idées cartésiennes ...". Il considère, de toute évidence, le projet Maxwellien comme celui d'arriver à une théorie mécanique des phénomènes électromagnétiques :

"Que les disciples de Descartes se rassurent; le triomphe de la théorie électromagnétique ne trancherait pas par la négative la question de savoir si tout, dans la nature physique, se réduit aux grandeurs, figures et mouvements; une pareille décision passe la compétence de la physique; à cette question : les lois de la lumière ne sont-elles que des conséquences des principes de la mécanique ? la théorie électromagnétique substitue simplement celle-ci: les phénomènes électriques sont-ils réductibles au mouvement ?"<sup>20</sup>

Duhem expose alors, avec un certain sarcasme, le modèle de l'éther proposé par Maxwell dans le mémoire de 1861/2 : l'éther y se serait conçu comme un "gâteau de miel". Dans l'éther gyrostatique de W. Thomson "la larve qui habite chaque loge" serait alors remplacée" par une sorte de petite toupie". Ces "mécanismes" ne doivent rien, selon Duhem, à ceux inventés par Descartes. Il cite à ce sujet Pascal, et sa critique du besoin de "composer la machine" dont ressentent souvent les physiciens, pour conclure :

"Gardons-nous, cependant, de sourire de la bizarre machine composée par Maxwell et par sir W. Thomson; peut-être sera-t-elle la vérité incontestable de demain, — en attendant qu'elle devienne l'erreur incontestée d'après-demain!"<sup>21</sup>

Nous remarquons, encore une fois, que Duhem caractérise la méthodologie de Maxwell par rapport aux accomplissements du mémoire PH et qu'il l'associe toujours, comme dans son article de 1892, à W. Thomson. Nous discuterons, plus bas, ce point de vue.

L'histoire de l'Optique est un exemple — poursuit Duhem — du remplacement d'une théorie par une autre, chacune ayant son époque de prédominance où elle est considérée comme "l'expression adéquate de la

nature des choses". Ce mouvement pourrait renforcer chez certains, la conception sceptique d'après laquelle les théories physiques seraient des "châteaux de cartes", destinés à être balayés l'un après l'autre. Duhem oppose à cette dernière une conception continuiste singulière de l'histoire des sciences. Il voit (...)

"... parmi les vicissitudes intellectuelles dont est tracée l'histoire des sciences, le fil d'une tradition, d'un progrès lent, mais ininterrompu ..."

Selon lui une théorie physique transmet toujours une partie de ses "conquêtes". Elle transmet, en premier lieu, les "lois expérimentales qu'elle a fait découvrir ou qu'elle a, tout au moins, aidé à débrouiller". Mais il souligne que cela n'est pas la seule contribution d'une théorie physique. Il insiste alors sur le rôle du langage mathématique dans le progrès scientifique. En rappelant le but de la théorie physique et les procédés — définition des grandeurs, choix d'hypothèses — qui la constituent, il met en évidence que (...)

"... à toute loi physique, à toute proposition indiquant une relation fixe entre les qualités des corps, elle substitue une formule mathématique; à tout raisonnement portant directement sur ces qualités, elle substitue le calcul, c'est-à-dire la forme la plus concise et la moins faillible du syllogisme (...) aux ambiguïtés du langage ordinaire, elle substitue (...) la langue de l'algèbre; par là, à l'inextricable confusion où se mêlerait la foule des lois naturelles, elle substitue un enchaînement qui classe méthodiquement les lois formulées ...".<sup>22</sup>

Tout en signalant le rôle historique des systèmes métaphysiques dans l'accession à la physique mathématique, Duhem prône leur indépendance. Les théories mécaniques correspondent à un idéal métaphysique qui éliminé, révélera la vraie continuité de l'histoire des sciences:

"... les hypothèses mécaniques ont disparu, émiettées par les contradictions de l'expérience ou enlevées par le torrent qui roule, depuis trois siècles, les systèmes mé -

taphysiques; mais la physique mathématique est demeurée; la représentation du monde matériel que chaque théoricien construit, c'est l'échafaudage qui lui permet de sculpter une figure nouvelle à la frise du temple de la science; l'échafaudage enlevé, nos yeux n'en contemplant que mieux l'oeuvre de l'artiste et l'harmonieux enchaînement qui la relie à l'oeuvre de ses prédécesseurs".<sup>23</sup>

La théorie de Fresnel aurait ainsi légué à la science, non pas l'hypothèse d'un éther — dont Duhem fait état de la disparition imminente — mais l'idée que "la grandeur représentative du phénomène lumineux est régie par les mêmes équations que les mouvements transversaux des solides élastiques".<sup>24</sup>

Son image de la marée qui monte imperceptiblement dans le va-et-vient des lames d'eau sur le sable, illustre la conviction Duhemienne d'un progrès scientifique.

#### SECTION VI.3- MAXWELL, LES EXPLICATIONS MECANIQUES ET L'"ECOLE ANGLAISE

Dès 1893, dans son article "L'école anglaise et les théories physiques", Duhem désigne Maxwell comme un exemple dans sa dichotomie entre un "génie scientifique anglais" et un "génie continental". Maxwell et W. Thomson auraient incarné d'une façon achevée les traits du "génie anglais". Cette dichotomie Duhem va l'explorer jusque dans son ouvrage La Théorie Physique, où elle se présentera comme une opposition entre deux types "d'esprit".

Duhem développe dans ces deux écrits une espèce de "psychologie de la découverte" assez superficielle, associée à des considérations épistémologiques concernant la théorie physique.

Il y caractérise deux sortes "d'esprits" : l'esprit "ample" et l'esprit "profond"; ou encore l'esprit "imaginatif" et l'esprit "abstrait".<sup>25</sup> Duhem s'est vraisemblablement inspiré d'une dichotomie analogue existante chez Pascal. Chaque esprit aurait une "faculté" men

mentale prédominante. La faculté "d'imagination" serait plus développée dans l'esprit "ample" et la faculté de "raison" dans l'esprit "profond". L'esprit "profond" serait ainsi adapté au travail d'abstraction, nécessaire à l'élaboration d'une théorie physique. L'esprit "ample" et "imaginatif", par contre, ne verrait pas dans le travail d'abstraction un moyen d'économie intellectuelle et s'épanouirait de préférence dans le travail d'agencement d'objets qui "tombent sous le sens".

Parmi les anglais on trouve, selon Duhem, davantage d'esprits "amples" et "imaginatifs", et parmi les continentaux plutôt des esprits "profonds" et "abstraits".

Nous n'avons pas l'intention, ici, d'examiner cette classification Duhemienne des esprits, dans tout ce qu'elle comporte d'arbitraire et même de grotesque (on songe à certains passages de La Théorie Physique). Nous sommes particulièrement intéressés par l'usage qu'en fait Duhem pour caractériser des traditions méthodologiques distinctes dans le XIX<sup>ème</sup> siècle, notamment en ce qui concerne les explications mécaniques et le rôle des mathématiques dans les théories physiques.

#### Les Théories Mécaniques dans deux traditions de recherches

Duhem soutient que chaque type d'esprit engendre une théorie physique ayant une structure singulière, en rapport intime avec l'objet qui lui est assigné. Il applique sa classification d'esprits à la distinction des théories mécaniques élaborées par "l'Ecole anglaise" d'une part, et par les "continentaux" d'autre part.

L'Ecole anglaise" est, selon lui, "acquise entièrement aux explications mécaniques des phénomènes physiques". La particularité des théories mécaniques dans cette tradition porte sur l'utilisation des "modèles mécaniques".

Par "modèle mécanique" Duhem entend un agencement "de corps

concrets, semblables à ceux que nous voyons ou que nous touchons".<sup>26</sup>

Le modèle est une "représentation mécanique" qui rappelle "pour certaines analogies plus ou moins grossières, les particularités de la théorie qu'il s'agit d'exposer ...".<sup>27</sup> Il est donc fondé sur des analogies "entre les propriétés de l'appareil (mécanisme) et les propositions de la théorie qu'il s'agit d'ILLUSTRER..."<sup>28</sup>

Le modèle mécanique est, de cette façon, lié aux concepts de représentation, d'illustration, aussi bien qu'à ceux d'imitation et de simulation. Le modèle - dit-il - "imite le phénomène". Le "jeu" du mécanisme "simule les propriétés des corps".<sup>29</sup>

La faculté d'imagination, particulièrement développée chez les savants britanniques, est celle qui permet d'associer le modèle mécanique aux propriétés des corps :

"... l'imagination, que seule le modèle intéresse, sera seul juge de la ressemblance entre la figure et l'objet figuré".<sup>30</sup>

Il n'y aurait donc aucune "justification" rationnelle du "rapprochement" entre un modèle mécanique et un groupe de phénomènes.

L'usage de modèles mécaniques est donc le trait distinctif des théories mécaniques de l'Ecole anglaise, comparées à celles de la tradition mécaniste continentale :

"... ce qui distingue l'Ecole anglaise, ce n'est point d'avoir tenté la réduction de la matière à un mécanisme, c'est la forme particulière de ses tentatives pour obtenir cette réduction".<sup>31</sup>

Les théories mécaniques continentales feraient moins appel à la "faculté imaginative", encore que la quête d'explications mécaniques reflète toujours pour Duhem, "une victoire de l'imagination sur la raison". Les exigences "rationnelles" y seraient, néanmoins, plus manifestes que dans les théories mécaniques anglaises.

Le paradigme des théories mécaniques continentales est, selon Duhem, le programme cartésien de réduction des phénomènes physiques "à

la géométrie et au mouvement". A partir de ce presupposé métaphysique "la raison prend le dessus" et déduit des conséquences de façon à "construire le mécanisme qui doit représenter la matière".<sup>32</sup>

Les théories mécaniques continentales satisfont ainsi les exigences de "simplicité" et "d'abstraction". Les savants continentaux — affirme Duhem —

"... demanderont que l'on réduise la matière, en dernière analyse, à un petit nombre d'espèces d'atomes élémentaires deux ou trois au plus; que ces atomes aient des formes géométriques simples, qu'ils soient doués seulement de quelques propriétés mécaniques essentielles, que ces propriétés soient exprimées en des propositions très brèves et très faciles à comprendre; propositions qu'ils chercheront d'ailleurs à justifier par des considérations métaphysiques".<sup>33</sup>

Les explications mécaniques de l'Ecole anglaise ne remplissent pas, selon lui, ces exigences. Les modèles proposés y sont "compliqués"; les "matériaux" qui les composent sont des corps puisés dans le monde concret, macroscopique. Il n'y a en plus aucune tentative de donner une justification métaphysique de leurs propriétés :

"... leur nature n'a pas besoin d'être philosophiquement définie; il suffit que leurs propriétés tombent sous les sens; les mécanismes qui servent à composer ne sont pas destinés à être vus par l'imagination".<sup>34</sup>

Chaque type d'explication mécanique est associé, de cette façon, à une conception particulière de l'objet des théories physiques :

"Cette tendance à voir dans la théorie mathématique une explication métaphysique de l'univers contraste singulièrement avec la tendance des physiciens anglais qui n'y voient jamais qu'un modèle..."

Pour l'école anglaise les théories physiques constituent des simples "représentations" et non pas des "explications" des phénomènes. Les physiciens continentaux cherchent, par contre, une explication à par-

tir d'une ontologie fixée préalablement :

" Le physicien français de la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, du commencement du XIX<sup>ème</sup> siècle, pose, au début de toute théorie, un certain nombre d'hypothèses qui, pour lui, définissent les propriétés premières, essentielles, élémentaires de la matière, puis, de ces hypothèses fondamentales, il cherche à déduire, par une suite logiquement enchaînée de raisonnement précis, l'explication de tous les phénomènes de la physique; aucun ne doit rester en dehors de la chaîne, car les hypothèses fondamentales sont censées définir toutes les propriétés premières de la matière d'où découlent, comme les effets de leurs causes, tous les phénomènes que nous observons".<sup>35</sup>

Comme dans l'Ecole anglaise la physique mathématique n'a pas ce but "explicatif", les théories ne sont pas censées remplir les mêmes exigences logiques :

"... la théorie mathématique échappe à la domination de la logique; il est permis au physicien anglais de construire un modèle pour représenter un groupe de lois et un autre modèle sans lien avec le précédent pour représenter un autre groupe de lois, et cela lors même que certaines lois seraient communes aux deux groupes; pour un géomètre de l'école de Laplace et de Cauchy; il serait absurde de donner d'une même loi deux explications distinctes et de soutenir que ces deux explications sont vraies en même temps; pour un physicien anglais, il n'y a aucune contradiction à ce qu'une même loi soit figurée de deux manières différentes par deux modèles différents".<sup>36</sup>

#### Les "Modèles Algébriques"

Une autre différence entre les théories qui, selon Duhem, seraient notamment répandues en Angleterre et les théories continentales, concerne le rôle accordé au formalisme mathématique. Ici nous trouvons chez Duhem une autre catégorie de modèle: le "modèle algébrique".

Dans les théories continentales l'algèbre aurait selon lui , un rôle "auxiliaire", le calcul pouvant être remplacé par un raisonnement purement logique. Dans les théories anglaises, par contre, le formalisme mathématique fonctionnerait comme un "mécanisme".

Cette différence chez Duhem se réfère, il nous semble, à la question de l'interprétation du formalisme. Dans les théories continentales, cette interprétation est effectuée par des modalités "rationnelles", assurée par les définitions des grandeurs et les hypothèses admises :

"... il faut qu'on sente, à chaque instant, la possibilité de remplacer le calcul par le raisonnement purement logique dont il est l'expression abrégée; et, pour que cette substitution puisse se faire d'une manière précise et sûre il faut qu'une correspondance très exacte et très rigoureuse ait été établie entre les symboles, les lettres que combine le calcul algébrique, et les propriétés que mesure le physicien, entre les équations fondamentales qui servent de point de départ à l'analyste et les hypothèses sur lesquelles repose la théorie".<sup>37</sup>

Dans les théories continentales, la suite de transformations algébriques serait donc fondée sur une suite de syllogismes. Le physicien continental cherche, ainsi (...)

"... sous les transformations algébriques, une suite de déductions qui conduisent d'hypothèses nettement formulées à des conséquences vérifiables par l'expérience".<sup>38</sup>

Il est important de souligner le rôle attribué par Duhem à la définition des grandeurs et au choix d'hypothèses dans son analyse sur la place des mathématiques dans la théorie physique. C'est par l'intermédiaire de ces deux procédures que le calcul peut être interprété comme une chaîne déductive.

Or, il constate dans les "théories anglaises" une absence de définition précise des grandeurs et d'hypothèses concernant "les propriétés premières, essentielles, élémentaires de la matière".<sup>39</sup> A défaut de cela, le formalisme fonctionne en tant que "modèle algébri -

que" dont les liens avec les lois physiques seraient assurés uniquement par "l'imagination".

Les théories de Maxwell contiennent des exemples pour Duhem de cet usage des mathématiques. Duhem s'en prend particulièrement à la "presque absence de définition" de la grandeur "flux de déplacement" dans les théories du savant écossais.

#### Modèles Mécaniques et Modèles Algébriques

Duhem voit, curieusement, une analogie entre les modèles mécaniques et les modèles algébriques. Ainsi, dit-il, ces derniers (...)

"... au lieu d'être construits avec des gyrostats, des ressorts à boudin, de la glycérine, sont des agencements de signes algébriques".<sup>40</sup>

De la même façon dont il souligne le manque de lien "rationnel" entre le modèle mécanique et les objets réels qu'il est censé représenter, Duhem fait état d'une coupure semblable entre le modèle algébrique et les lois physiques. Il prend, encore une fois, Maxwell pour exemple :

"... aux intuitions de la faculté imaginative il laisse le soin de comparer les lois physiques et le modèle algébrique qui les doit imiter; sans s'attarder à cette comparaison, il suit le jeu de ce modèle; il combine les équations de l'Electrodynamique sans chercher le plus souvent, sous chacune de ces combinaisons, une coordination des lois physiques".<sup>41</sup>

Là se trouveraient, pour Duhem, les raisons de la difficulté d'acceptation que les théories de Maxwell ont rencontré sur le continent. Un physicien continental est alors tenté, comme Hertz, de réduire la théorie de Maxwell à ses seules équations.

La place faite aux modèles, aussi bien mécaniques qu'algébriques, dans les théories anglaises, affecte selon Duhem leur unité et coordination logique.

Il rappelle ainsi que W. Thomson ne s'interdit pas de proposer plusieurs "modèles mécaniques" différents pour un même ensemble de phénomènes.

Maxwell déploie aussi, selon lui, plusieurs "modèles algébriques" incompatibles dans ses écrits et, particulièrement, dans le Treatise.

#### Modèles et Heuristique

Duhem rejette l'opinion qui attribue une valeur heuristique à cette profusion de modèles dans les théories anglaises. Les modèles serviraient selon lui, plutôt à des fins "d'exposition" qu'à ceux "d'invention".

Il soutient que la recherche historique permet de mettre en évidence que les modèles ont souvent succédé à une "théorie abstraite", et qu'il faut donc attribuer à celle-ci les progrès accomplis, et non pas à l'usage des modèles.

Duhem fait dans ce contexte une distinction nette entre modèle et analogie. A ces yeux la méthode analogique aurait joué un rôle heuristique indéniable dans l'histoire de la physique. La méthode analogique, dit-il,

"... de tous les procédés mis en oeuvre pour construire des théories physiques, a été la plus sûre et la plus féconde".<sup>42</sup>

Un exemple d'analogie est celle qui existe entre une "onde sonore" et une "onde lumineuse", ou encore l'analogie entre les aimants et les diélectriques dans les processus de polarisation.

Mais il y aurait pour Duhem une forme "plus précise" d'analogie, mise en évidence par Maxwell dans l'introduction du mémoire FA :

"Deux catégories de phénomènes très distinctes, très dissemblables ayant été réduites en théories abstraites, il peut arriver que les équations où se formule l'une des théories soient algébriquement identiques aux équations qui expriment l'autre. Alors, bien que ces deux théories soient essentiellement hétérogènes par la nature des lois qu'elles coordonnent, l'algèbre établit entre elles une exacte correspondance; toute proposition de l'une des théories a son homologue dans l'autre, tout problème résolu dans la première pose et résout un problème semblable dans la seconde"

Dans ce cas une théorie "illustre" une autre.

La méthode d'analogie servirait non seulement aux besoins "d'économie intellectuelle", mais pourrait aussi intervenir comme "procédé d'invention":

"... il peut arriver, en effet, qu'en l'un de ces deux domaines auxquels convient le même plan algébrique, l'intuition expérimentale pose tout naturellement un problème, qu'elle en suggère la solution, tandis qu'en l'autre domaine, le physicien n'eût pas été aussi aisément conduit à formuler cette question ou à lui donner cette réponse".<sup>43</sup>

Cette procédure est pour Duhem parfaitement légitime au point de vue logique, puisqu'elle (...)

"... ne rejette pas l'intelligence, logiquement conduite, de notions abstraites et de jugements généraux pour la remplacer par la vision d'ensembles concrets".<sup>44</sup>

SECTION VI.4-- DISCUSSION DES ANALYSES DE DUHEM SUR  
LA PHYSIQUE ANGLAISE DE LA DEUXIEME  
MOITIE DU XIX<sup>ème</sup> SIECLE

Nous devons apprécier, en tant qu'historiens, le tableau que Duhem dresse de la physique mathématique "anglaise" et "continentale" au XIX<sup>ème</sup> siècle. Peut-il être considéré comme fidèle aux faits historiques, ne serait-ce qu'approximativement ? Si nous sommes amenés à répondre à cette question par la négative, il faudra alors considérer ce tableau comme un exemple de l'usage apologétique de l'histoire des sciences.

Duhem considère que W. Thomson et J. C. Maxwell incarnent d'une façon exemplaire les traits d'un physicien de "l'Ecole Anglaise". Or, si nous examinons l'oeuvre de ces deux savants, particulièrement dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, les analyses de Duhem sont loin de correspondre à la méthodologie employée par eux.

Dans l'Appendice A nous avons mis en évidence la diversité des options méthodologiques de W. Thomson tout au long de sa carrière scientifique. Sa prise de position en faveur des explications mécaniques des phénomènes physiques correspond à une phase relativement tardive, à laquelle Duhem se réfère vraisemblablement. Duhem "oublie", toutefois, que W. Thomson a été à l'origine, avec Rankine et Tait notamment, de la "théorie dynamique" anglaise, caractérisée par l'application du formalisme Lagrangien à des domaines autres que la Mécanique. Or, nous avons déjà montré dans ce travail que cette nouvelle approche des phénomènes physiques fait l'économie de considérations sur tout "mécanisme caché" et qu'elle a contribué ainsi, d'une façon décisive, à la dé-mécanisation de la physique de la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Mis à part le portrait méthodologique un peu simpliste que donne Duhem de W. Thomson, nous voudrions relever ici surtout l'amalgame qu'il fait entre ce savant et J. C. Maxwell.

Un fait historique assez éloquent qui n'a sûrement pas dû échapper à Duhem, est la critique de W. Thomson de la théorie électro -

magnétique de la lumière de Maxwell. Cette critique portait exactement sur la difficulté (qui s'avérera une impossibilité) de fournir un fondement mécanique à cette théorie. W. Thomson donnait sa préférence aux théories éther-élastiques de la lumière — qui admettaient une interprétation mécanique plus immédiate des phénomènes lumineux — sur la théorie électromagnétique, qui, selon lui, offrait une explication des phénomènes lumineux à partir d'autres phénomènes encore moins bien connus (lire: sans interprétation mécanique consistante). Nous croyons que ce fait dénonce une différence entre les conceptions méthodologiques des deux savants écossais. Les recherches de Maxwell reflètent, contrairement aux écrits de Duhem que nous venons d'analyser, une attitude pluraliste dans le travail de création scientifique. Nous essayerons, par la suite, de rendre compte synthétiquement, de la pluralité d'approches utilisées par Maxwell dans ses recherches en électricité et magnétisme.

#### Aspects Méthodologiques de l'Oeuvre de Maxwell en Electricité et en Magnétisme

Dans chacun de ses trois premiers mémoires en électricité et magnétisme Maxwell a utilisé une méthodologie singulière, dans le but d'arriver à une théorie de ces phénomènes. Sous cette diversité méthodologique il y a un presupposé métaphysique qui donne cohérence et continuité à son projet global: l'idée que les actions électriques et magnétiques sont transmises de proche en proche. Il n'est pas lieu ici de discuter comment cette idée maîtresse a pu recevoir une traduction mathématique, mais il est simplement nécessaire de la mettre en évidence comme l'idée qui confère le sens et l'originalité à la démarche de Maxwell dans ce domaine. Nous avons d'ailleurs une certaine perplexité devant le fait que cette idée n'ait pas eu, de toute évidence, un rôle significatif dans la réception des théories de Maxwell en France.<sup>46</sup>

Les trois volets méthodologiques des recherches de Maxwell correspondent à ses tentatives de fournir des analogies physiques, des

explications mécaniques, et des explications dynamiques des phénomènes électriques et magnétiques. Ils sont développés, respectivement, dans chacun des trois premiers mémoires de Maxwell en électricité et magnétisme.

La question centrale de l'introduction du mémoire FA de Maxwell est celle du rapport entre "idées physiques" et "idées mathématiques" dans un domaine qui manque, selon l'auteur, de données expérimentales et dont les résultats acquis restent souvent sans liens entre eux. La tâche d'une "théorie électrique" serait justement d'établir ces liens, tout en incorporant des lois déjà connues, et de calculer des "effets" en dehors des limites d'application de ces lois.

Maxwell est, toutefois, sceptique sur les moyens d'arriver à une telle théorie à l'époque où il écrit son mémoire. On doit se contenter — dit-il — d'une "simplification" et d'une "réduction" des résultats déjà disponibles. Dans ce but il remarque qu'on peut faire usage soit d'une "formule mathématique", soit d'une "hypothèse physique".

Maxwell semble ici faire référence aux voies empruntées, d'un côté notamment par Lagrange et Fourier et, de l'autre côté par l'école mécanico-moléculaire française représentée par Laplace et ses disciples.<sup>47</sup> La démarche des deux premiers était d'éviter des hypothèses et de limiter la portée de la théorie physique à l'expression analytique des données d'observation. Le "programme" Laplacien était celui d'expliquer les phénomènes physiques en termes de particules et de forces agissantes à distance.

Maxwell propose dans le mémoire FA une troisième voie qui puisse faire avancer le travail théorique sans courir le danger de s'attacher "aveuglement" à une "explication partielle" (méthode hypothético-deductive), ni celui de perdre l'intuition physique au milieu de "subtilités analytiques" (méthode de Fourier).

La troisième voie que veut emprunter Maxwell se fonde sur

l'existence "d'analogies physiques". Une analogie physique est définie comme une (...)

"... partial similarity between the laws of one science and those of another which makes each of them illustrate the other".<sup>48</sup>

La méthode d'analogie permet selon lui d'obtenir des "idées physiques sans faire appel à une théorie physique".

L'analogie la plus universelle serait celle entre les "lois physiques" et les "lois des nombres". Elle permet de "réduire les problèmes de la nature à des déterminations de quantités a travers des opérations sur des nombres".<sup>49</sup> De ce niveau on passe à celui d'analogies partielles, à des ressemblances dans la forme mathématique entre les lois d'un domaine de phénomènes et celles d'un autre domaine.

Les analogies permettent, selon Maxwell, la mise en forme mathématique de certains concepts comme celui de "ligne de force".

Maxwell développe ainsi dans le mémoire FA, une analogie entre les lignes de force et le mouvement d'un fluide incompressible à travers un milieu résistant. Cette analogie est ensuite appliquée à l'étude des diélectriques, des milieux magnétiques, de l'induction électromagnétique, etc.

Maxwell souligne, cependant, qu'il ne prétend pas, par l'intermédiaire de la méthode d'analogie, élaborer une "théorie physique", ou déceler la "cause des phénomènes".<sup>50</sup>

Dans son deuxième mémoire, Maxwell se propose à dépasser le stade caractérisée par la mise en place "d'illustrations mécaniques" des phénomènes électriques et magnétiques, comme c'était le cas dans le mémoire précédent. Il s'agit maintenant de proposer une théorie fondée sur une "hypothèse mécanique". Il a, cependant, une nette préoccupation de distinguer les différents niveaux auxquels renvoie sa théo-

rie: ceux d'une "hypothèse mécanique", d'une "cause mécanique" et celui d'un "mécanisme". Il y aurait une indépendance logique entre ces niveaux, ainsi qu'une différence dans leur statut épistémologique.

L'hypothèse mécanique répond, selon Maxwell, à l'exigence d'une explication par l'action contigüe des effets mécaniques observés dans le champ électromagnétique. Cette hypothèse, formulée à l'origine par Faraday, est celle d'un certain état de contrainte dans le milieu : une "tension" au long des lignes de force, et une "pression" latérale (perpendiculaire) à ces lignes. Maxwell souligne que la théorie obtenue à partir d'une telle hypothèse a un statut indépendant de toute recherche relative à la cause des contraintes du milieu.

Dans un deuxième niveau d'explication, Maxwell montre alors que la distribution des contraintes peut être considérée comme le résultat de l'existence d'un mouvement tourbillonnaire dans le champ. La vitesse de rotation des tourbillons est supposée proportionnelle à la force magnétique. Cette explication, toutefois, n'est pas vue comme certaine, mais uniquement comme "probable" .

Le troisième niveau d'explication est celui de la spécification des détails d'un mécanisme supposé être à la base des phénomènes observés dans le champ: non seulement les phénomènes mécaniques déjà expliqués au premier niveau par action contigüe, mais surtout le phénomène d'induction électromagnétique. Il s'agira de montrer, alors, comment les courants électriques sont connectés au champ magnétique (interprété comme un mouvement tourbillonnaire). Maxwell introduit dans ce but, les particules qui vont articuler les mouvements des vortices (tourbillons) contigus. Ces particules jouent le rôle de l'électricité. Un flux de particules constituerait, dans cette hypothèse, un courant électrique. Maxwell explique alors comment un courant électrique, par la mise en mouvement des vortices, crée le champ magnétique. Le phénomène de l'induction électromagnétique pourra ainsi être expliquée par la modification du régime rotationnel des vortices, et par l'action mutuelle entre ceux-ci et les particules. La force électromotrice sera interprétée comme une pression de la paroi des vortices sur les particules.

Maxwell reste, toutefois, très prudent à l'égard du statut épistémologique accordé à ce mécanisme, en particulier en ce qui concerne les particules :

"The conception of a particle having its motion connected with that of a vortex by perfect rolling contact may appear somewhat awkward. I do not bring it forward as a mode of connexion existing in nature, or even as that which I would willingly assent to as an electrical hypothesis. It is, however, a mode of connexion which is mechanically conceivable, and easily investigated, and it serves to bring out the actual mechanical connexions between the known electro-magnetic phenomena; so that I venture to say that any one who understands the provisional and temporary character of this hypothesis, will find himself rather helped than hindered by it in his search after the true interpretation of the phenomena".<sup>51</sup>

Maxwell considère donc sa théorie comme provisoire. Elle ne fait, dit-il, "qu'imiter" les phénomènes. Peut-être ne releverait-elle que d'une "coïncidence partielle" dans l'expression mathématique de deux sortes de phénomènes ayant des natures diverses.

En dépit de cela, Maxwell arrivera dans la troisième partie du mémoire PH à la première formulation de sa théorie électromagnétique de la lumière. Elle sera fondée sur ce mécanisme auquel Maxwell ajoute une hypothèse supplémentaire: l'élasticité de la substance dont, il le suppose, sont remplies les "cellules"<sup>52</sup> du milieu électromagnétique.

Le troisième mémoire de Maxwell marque un tournant méthodologique majeur dans son oeuvre en électricité et magnétisme. Le passage que nous avons cité plus haut est révélateur du faible degré de crédibilité que Maxwell accordait à l'hypothèse des particules dans son mécanisme. Elles disparaissent complètement de son oeuvre à partir du mémoire DT. L'idée des tourbillons sera, toutefois, maintenue, d'une façon plus ou moins accessoire, jusqu'aux derniers de ses écrits.

On ne trouve, à vrai dire, plus de trace d'un mécanisme à partir du mémoire DT. La théorie proposée n'est plus "mécanique", mais "dynamique". Matière et mouvement constitueront le fondement ontologique de la nouvelle théorie qui ne rentrera plus dans les détails d'un mécanisme qui sera, désormais, caché. Les outils qui vont permettre l'élaboration d'une "théorie dynamique du champ électromagnétique" seront: une utilisation accrue du concept d'énergie et des méthodes empruntées à la Mécanique Analytique.

Toute référence à des expressions qui renvoient à des concepts mécaniques n'est qu'un appui psychologique ou pédagogique. Ces références à la mécanique constituent effectivement de simples "illustrations", et non pas des "explications".

Néanmoins, la théorie proposée dans le mémoire DT reste une théorie mécanique, en ce qu'elle ne conçoit l'énergie électromagnétique qu'en tant qu'énergie mécanique (sous ces formes potentielle et cinétique). Le terme le plus adéquat est plutôt celui de théorie dynamique — choisi par Maxwell — puisqu'il met l'accent sur le rôle central du concept d'énergie. Ce dernier devient, en fait, le concept primaire à la place de celui de force, aussi bien dans son rôle clef dans la construction théorique que dans la caractérisation même du statut mécanique de la théorie. Quand Maxwell affirme que l'énergie du champ électromagnétique est de l'énergie mécanique, il veut être compris, dit-il, "littéralement".

Dans la "théorie dynamique" du mémoire DT les agencements des parties du mécanisme ne sont plus explicités. La seule condition imposée sera que cet agencement obéisse à des lois générales, en l'occurrence aux lois de la dynamique. Maxwell spécifie uniquement la "forme de la relation entre les mouvements" des parties du mécanisme.

Cette approche du mémoire DT trouvera son expression aboutie dans la théorie des circuits électriques du Treatise. Maxwell appliquera alors le formalisme Lagrangien dans l'étude des interactions entre les courants électriques dans le "champ".

Le tournant méthodologique du troisième mémoire ne doit pourtant pas être considéré comme l'abandon du projet d'arriver à une

"théorie mécanique complète" des phénomènes électromagnétiques. Maxwell réaffirmera cette intention même dans le Treatise. Sa démarche à partir du troisième mémoire n'était au départ qu'un répit, étant donné le caractère trop provisoire — nous dirions AD HOC — des hypothèses du deuxième mémoire. L'importance du principal accomplissement de ce dernier mémoire, à savoir la théorie électromagnétique de la lumière, appelait des assises théoriques plus solides, que va offrir la "théorie dynamique".

Lectures de l'Oeuvre de Maxwell chez Duhem et chez Poincaré

Les critiques de Duhem des tentatives d'explication mécanique des phénomènes électromagnétiques chez Maxwell ne peuvent donc, être imputées qu'au mémoire PH. Nous avons mis en évidence l'appréciation assez réservée de Maxwell concernant cette théorie mécanique et son abandon à partir du mémoire DT. Le silence de Duhem, dans les écrits rapportés jusqu'ici est donc significatif, à l'égard de la réorientation méthodologique effectuée par Maxwell à partir de son troisième mémoire.

Nous voudrions également remarquer l'importance attribuée par Duhem à la méthode d'analogies physiques, que Maxwell applique dans son premier mémoire. Contrairement à son jugement entièrement négatif vis-à-vis du rôle des explications mécaniques dans le travail scientifique, Duhem crédite à cette méthode une valeur "heuristique" et la trouve entièrement compatible avec son épistémologie.

Le tableau que nous trace Duhem de la physique britannique et de Maxwell en particulier, est donc extrêmement partiel. Il ne prend pas en compte le pluralisme méthodologique qui constitue l'aspect le plus original des recherches menées par les physiciens britanniques dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Nous ne pouvons donc que souscrire à l'analyse que fait Moyer de Duhem, si l'on se limite, cependant, aux articles considérés

jusqu'ici :

"Duhem correctly identified his colleagues across the channel as mechanical philosophers, but he failed to recognize their achievement. The basic ideas of their program were that observable phenomena can be reckoned as transformations of energy and that laws of these phenomena can be calculated by applying the generalized equations of motion, all of this without recourse to any hypothesis about hidden machinery. If all energy is necessarily embodied in some material system, and if abstract dynamics applies only to material systems, then this program does generate mechanical explanations, even though the underlying machinery remains hidden. Henri Poincaré was less antagonistic towards convenient mechanical explanations than Duhem and recognized this ...".<sup>53</sup>

La comparaison que fait Moyer des lectures de Maxwell par Poincaré et Duhem est tout à fait pertinente . Tandis que Poincaré met l'accent sur les tentatives de "théorie dynamique" chez Maxwell, Duhem met en avant surtout les tentatives de "théorie mécanique". Sans aucun doute ces deux lectures sont révélatrices de l'accueil que l'oeuvre du savant écossais a reçu de la part de l'un et de l'autre.

Mais nous sommes intéressés surtout aux rapports entre la réception des théories de Maxwell (représentée par chacune de ces lectures partielles) et les épistémologies que soutiennent Poincaré et Duhem.

Les conceptions de ces deux savants sur l'objet des théories physiques nous semblent convergentes à plusieurs égards. Ainsi, tous les deux soutiennent que la théorie physique ne doit pas et, strictement, ne peut pas être concernée par l'essence des phénomènes, leur "vraie" nature, le "fond des choses", pour utiliser des expressions de Poincaré. D'une façon cohérente ils rejettent donc la recherche des explications mécaniques (complètes) des phénomènes physiques. Poincaré donne une preuve qu'il y a toujours une infinité de solutions possibles au problème. Duhem fait référence à cette preuve et, à la suite de Poincaré, considère cette quête d'explications mécaniques comme relevant de la "métaphysique".

Duhem semble aller encore plus loin que Poincaré quand il dénonce le rôle nuisible, pour l'activité scientifique, des exigences mécanistes. Elles limiteraient la **liberté** du physicien dans la construction des théories physiques. Il soutient également que la quête d'explications mécaniques n'a joué aucun rôle dans l'histoire de la physique. Le progrès scientifique relève, selon Duhem, de la théorie en tant que construction mathématique abstraite, et non pas de l'éventuelle interprétation mécanique qu'on a pu donner de ses grandeurs.

Au sujet toujours de l'objet assigné à la théorie physique, Poincaré et Duhem semblent, toutefois, diverger sur la question de la valeur heuristique de ces théories. Poincaré défend la pluralité d'approches, de méthodologies, de théories concernant la même classe de phénomènes. Ce parti pris — qui lui fait considérer comme positive la présumée existence de théories incompatibles dans l'oeuvre majeure de Maxwell — est en harmonie avec la valeur heuristique qu'il semble attacher aux théories physiques. Elles doivent, ainsi, ouvrir des nouvelles voies de recherche et suggérer des nouvelles expériences.

Duhem critique avec virulence ce qu'on pourrait appeler le pluralisme méthodologique ou l'instrumentalisme de Poincaré. Selon lui le but de la théorie physique n'est pas celui de découvrir des nouveaux phénomènes: cette tâche il l'attribue à la "méthode expérimentale". La théorie physique aurait surtout un rôle économique et de coordination ou classement des lois physiques. Il y a toujours, selon Duhem, des critères qui permettent de choisir parmi des théories physiques relevant de la même classe de phénomènes. Duhem ne peut pas accepter, comme Poincaré, une pluralité de théories, une pluralité d'approches. Des critères existent, soutient-il, pour trancher à chaque fois.

Le but de classement et de coordination logique que Duhem attache aux théories physiques le conduisent à poser des exigences strictes concernant leur structure. C'est à ce niveau que les points de vue de Poincaré et de Duhem divergent le plus profondément.

Duhem n'admet, effectivement, aucune contradiction logique dans une ou entre plusieurs théories qui se réfèrent à un même domaine. Il s'étonne alors que Poincaré ne rejette pas le Treatise de Maxwell

compte tenu de l'incompatibilité des théories qui s'y trouvent (conformément à ce qui est montré dans l'ouvrage Electricité et Optique ). Duhem prend ainsi le parti de la structure des théories élaborées dans la tradition de physique mathématique française. Poincaré prend, par contre, la défense des théories "provisoires" du Treatise, comme la théorie du déplacement électrique et ne relève pas l'incompatibilité qu'il démontre entre cette théorie et d'autres du Treatise. Si l'on assigne un objet légitime aux théories physiques, ce dernier soutient qu'on peut tirer profit d'une pluralité d'approches ou de théories. Poincaré donne une démonstration, dans l'ouvrage cité, de l'efficacité des démarches conventionnalistes<sup>54</sup> on peut souvent modifier une théorie de façon à la faire concorder avec une autre théorie, toutes les deux concernées par la même classe de phénomènes. La conception donc de Poincaré sur l'objet des théories, le conduit à une attitude plutôt permissive en ce qui concerne leur structure<sup>55</sup>.

Duhem lui reproche justement cela: une conception non réaliste de l'objet des théories physiques ne doit cependant pas conduire à un affaiblissement des exigences au niveau de leur structure.

Nous situons dans ce contexte les analyses un peu obscures de Duhem sur les "modèles algébriques" dans les théories scientifiques anglaises. La référence au Treatise de Maxwell est explicite, et nous soupçonnons qu'il est surtout question de la théorie de l'état de contraintes dans le milieu diélectrique. Poincaré avait montré l'incompatibilité entre cette théorie et la théorie du "fluide inducteur". Ces deux théories seraient, pour Duhem, des exemples de deux "modèles algébriques" ayant une indépendance mutuelle, à cause de l'absence d'une interprétation précise des grandeurs. Cette interprétation est réalisée, selon Duhem, moyennant les définitions des grandeurs et les hypothèses de la théorie. Or, il signale le manque de "définition précise" de la grandeur "flux de déplacement". Faute d'interprétation l'appareil mathématique acquiert, selon lui, une autonomie et fonctionne comme un modèle.

Cette critique, liée à son différend avec Poincaré, est révélatrice du rôle classificatoire qu'il attribue aux théories physiques.

Cette classificatin doit, selon lui, tendre vers une classification naturelle, où "l'ordre logique" des théories sera le reflet d'un "ordre ontologique". Nous reviendrons là-dessus plus loin.

Les articles de Duhem que nous avons analysées jusqu'ici nous semblent donc très peu fidèles à l'histoire de la physique au XIX<sup>ème</sup> siècle. Cette histoire est utilisée simplement comme une source d'exemples en appui à certaines thèses épistémologiques.

Nous allons par la suite considérer un ouvrage où le Duhem historien des sciences nous semble mieux représenté. Il s'agit de l'ouvrage L'évolution de la mécanique datée de 1903, où il est question de Maxwell dans divers contextes. Nous verrons que Duhem va combler, dans cet ouvrage, certaines lacunes que nous avons relevées plus haut en ce qui concerne son appréciation de l'oeuvre scientifique de Maxwell.

#### SECTION VI.5- LES THEORIES DE MAXWELL ET L'EVOLUTION DE LA MECANIQUE

Dans son ouvrage L'évolution de la Mécanique Duhem classe les théories de Maxwell parmi les théories mécaniques de l'électricité.

Maxwell aurait, toutefois, fait "deux tentatives menées par de des méthodes très différentes vers l'explication des phénomènes électriques"<sup>56</sup> Duhem fait référence ici à la théorie des vortices moléculaires du mémoire PH et à la théorie dynamique du champ électromagnétique du mémoire DT et du Treatise.

Dans le mémoire PH Maxwell aurait utilisé la méthode que Duhem appelle "synthétique", pour fournir une explication mécanique des phénomènes électromagnétiques :

"En cette méthode, on commence par construire de toutes pièces un mécanisme; on dit quels corps le composent, quelles en sont les figures, les grandeurs, les masses, quelles forces le sollicitent; de ces données, on tire les lois selon lesquelles se meut le mécanisme; comparant alors ces lois aux lois expérimentales que l'on veut expliquer on juge s'il y a entre elles une suffisante concordance".<sup>57</sup>

La théorie mécanique proposée par Maxwell dans le mémoire PH est classée par Duhem dans le même courant méthodologique à laquelle appartiennent : la théorie de la gravitation de Lesage; la théorie du calorique de Laplace; la théorie cinétique des gaz; l'éther gyrostatique de W. Thomson; la théorie de l'électron de Lorentz; les théories électromagnétiques de Larmor, de J.J. Thomson, etc. . Toutes ces théories sont, d'après Duhem, d'inspiration soit Cartésienne, soit Atomiste, en ce qui concerne la spécification de la nature du mécanisme.

Cette méthode serait tombée en désaveu, selon Duhem:

"Aux yeux de la plupart des physiciens, la méthode synthétique ne semble plus capable de donner une explication mécanique et complète des phénomènes naturels".<sup>58</sup>

La "méthode analytique" est venue la remplacer, — continue Duhem — toujours dans le but de fournir une explication mécanique des phénomènes physiques. La théorie dynamique des phénomènes électromagnétiques du Treatise constitue ici le paradigme de ce courant méthodologique, né des travaux de d'Alembert et de Lagrange. Dans cette méthode (...)

"... on réduit d'abord en formules générales les lois des phénomènes physiques, puis, sans faire aucune hypothèse sur la nature des mouvements par lesquels ces phénomènes pourraient s'expliquer, elle donne à ces formules un aspect qui fasse éclater aux yeux leur analogie avec les équations

de certains mouvements".<sup>59</sup>

Le fondement même de cette quête d'une explication mécanique qui est commune aux deux méthodes, fait néanmoins l'objet d'une critique épistémologique:

"... pour le physicien, l'hypothèse que tous les phénomènes peuvent s'expliquer mécaniquement n'est ni vraie, ni fausse, elle n'a, pour lui, aucun sens".<sup>60</sup>

Le mécanisme que la méthode synthétique pose au fondement de la théorie physique ne peut ainsi être soutenu que sur la base de principes métaphysiques, affirme Duhem.

Il montre également – par l'intermédiaire du célèbre raisonnement de Poincaré – que la quête d'explications mécaniques à travers la méthode analytique ne saurait aboutir à une seule théorie mécanique complète: elle en admet toujours une infinité. La Mécanique de Hertz<sup>61</sup> fournit, selon Duhem, la preuve qu'on peut, en chaque cas, réussir à donner aux lois des phénomènes la forme des équations de la mécanique, en supposant l'existence de certains mouvements cachés adéquats.

L'hypothèse d'après laquelle "tous les phénomènes s'expliquent mécaniquement" ne peut donc être, selon Duhem, ni confirmée, ni infirmée, et donc est "trascendente à la méthode physique".<sup>62</sup>

L'appel aux explications mécaniques des phénomènes physiques ne peut donc, selon lui, se prêter à un jugement "logique" et relève de la psychologie.<sup>63</sup> L'attachement des physiciens à ce type d'explication est une affaire personnelle. Le choix entre diverses explications mécaniques d'un même phénomène ne peut se fonder que sur des critères subjectifs, comme celui de "commodité", et ne s'impose donc pas d'une façon nécessaire et générale.

Duhem revient, alors, par ce biais, à sa classification des esprits en "abstraits" et "imaginatifs".

L'utilisation des modèles par "l'Ecole Anglaise" peut être comprise dans cette perspective. Puisque la méthode analytique ne saurait donner une explication des phénomènes, les physiciens anglais,

poussés par un "besoin psychologique", se seraient donnés à la construction de modèles qui simulent ou imitent ces phénomènes.

### Le Concept de Force et l'Evolution de la Mécanique

Une analyse approfondie de la "méthode analytique" va permettre à Duhem d'appliquer une grille à l'histoire de la mécanique et, d'une façon plus générale, aux tentatives de donner une explication mécanique des phénomènes physiques.

Duhem a consacré tout un chapitre de l'ouvrage L'évolution de la Mécanique à l'histoire de l'introduction du concept de "force d'inertie" en Mécanique, à partir du principe de d'Alembert. Il montre comment Lagrange a associé ce principe au principe des vitesses virtuelles, de façon à pouvoir transposer à la Dynamique, les résultats que d'Alembert avait obtenus en Statique. A partir de la force vive du système, Lagrange a montré comment on peut obtenir les forces d'inertie. Dans certains types de système Lagrange a montré comment les forces réelles peuvent être obtenues à partir des variations d'une grandeur qu'il a appelée le POTENTIEL.

Duhem voit dans cette démarche une modification du rôle central de la notion de force dans la dynamique Newtonienne :

"Ainsi la notion de FORCE, après s'être fondue dans une notion plus ample, celle de FORCE GENERALISEE, perd, pour ainsi dire, son caractère premier et irréductible et apparaît comme une simple dérivation de la notion de POTENTIEL; telle est la conséquence naturelle des principes posés par Lagrange, conséquence qui s'accorde pleinement avec les vues profondes de Leibniz".<sup>64</sup>

Le principe de la conservation de l'énergie devient l'instrument central du physicien.

A partir des fondements posés par Lagrange, Duhem montre

comment se sont développées des "écoles" en Mécanique, suivant la place accordée à la notion de force.

D'un côté les Laplaciens ont voulu éliminer complètement les notions de force d'inertie et de force de liaison, en supposant les corps composés de molécules exerçant entre elles des forces réelles. De cette façon on retourne à la mécanique Newtonienne, où il n'existait que des forces réelles. Poisson aurait poussé le plus loin ce programme d'une "mécanique physique" en opposition à une mécanique des "géomètres" (Mécanique analytique).

D'autres ont voulu éliminer complètement la notion de force de la Mécanique, en regardant la deuxième loi de Newton comme une définition de la force, et non pas comme une égalité entre la force et sa mesure. C'est la position nominaliste extrême, qui est restée stérile d'après Duhem.

La troisième voie aurait été ouverte par Hertz afin d'éliminer la notion de force des fondements de la Mécanique.<sup>65</sup> Dans sa Mécanique Hertz a effectivement tenté d'assimiler toute force réelle à des forces fictives d'inertie, moyennant la supposition de l'existence de mouvements cachés.

La théorie dynamique des phénomènes électromagnétiques du Treatise aurait été à l'origine de ce courant:

"Selon Maxwell, les physiciens étaient, depuis Ampère, victimes d'une illusion de ce genre lorsqu'ils regardaient les forces électrodynamiques et électromagnétiques comme des forces réelles. Ainsi que nous l'avons vu précédemment, le grand physicien écossais regarde ces actions comme des forces d'inertie, soit qu'il imagine, au sein des cellules, un fluide animé de rapides mouvements giratoires et auquel seraient appliquées ces forces d'inertie; soit qu'il tire cette interprétation de la seule inspection des formules de l'Electrodynamique!"

Maxwell n'aurait cependant pas poussé jusqu'au bout ce remplacement des forces réelles par des forces fictives d'inertie, comme le voulait Hertz:

"Dans les théories électriques de Maxwell, plusieurs des forces que les physiciens regardaient comme des forces réelles sont donc traitées comme des forces d'inertie; certains termes, qui l'on portait au compte du potentiel interne, sont désormais attribués à la force vive; toutefois ni les forces réelles, ni le potentiel interne ne sont complètement biffés. Le solide élastique qui forme les parois des cellules admet un potentiel interne qui varie avec les déformations de ces parois; ainsi naissent des forces réelles qui sont les forces électrostatiques. Lorsque Maxwell abandonnant l'hypothèse des cellules, se borne à donner des lois de l'électricité une expression qui rappelle les équations de Lagrange, il continue à regarder le potentiel électrostatique comme représentant un véritable potentiel interne et non pas une partie de la force vive".<sup>66</sup>

Dans l'éther adynamique et girostatique de W. Thomson, par contre, il n'y a plus de potentiel interne, et donc il n'y a plus de forces réelles mais uniquement des forces d'inertie :

"La Mécanique de Hertz, en effet, c'est l'extension à l'Univers physique tout entier des idées que W. Thomson avait appliquées au seul éther".<sup>67</sup>

DEUXIEME PARTIEDUHEM, LA CRITIQUE DES THEORIES DE MAXWELL ET LE PROGRAMME DE HELMHOLTZ

Duhem consacra de nombreuses études à l'électrodynamique et à l'électromagnétisme, en ayant comme objectif de poursuivre dans la voie ouverte par Helmholtz en 1870. Il cherchera, dans cette perspective, à interpréter l'évidence expérimentale disponible et à développer une théorie électromagnétique de la lumière. Nous allons donner un aperçu de ces recherches, qui s'étalent sur une période d'au moins vingt ans, sans cependant en faire une analyse détaillée, ce que nous éloignerait de notre sujet. Cet effort théorique de Duhem mérite, toutefois, d'être signalé car il est en rapport étroit avec sa critique des théories de Maxwell. Nous décelons aussi une continuité frappante entre ces recherches et les conceptions épistémologiques de Duhem.

Duhem semble dès très tôt avoir préféré l'électrodynamique de Helmholtz à d'autres théories concurrentes. Dans une note publiée dans les Comptes Rendus de 1885 il rejette l'explication de l'induction électrodynamique donnée par Weber, et soutient la théorie de Helmholtz sur la base de ses recherches sur le potentiel thermodynamique.<sup>68</sup>

A notre connaissance Duhem développe pour la première fois, d'une façon approfondie la théorie de Helmholtz dans ses Leçons sur l'électricité et le magnétisme publiées en 1891/2.

Son approche dans l'étude des phénomènes électriques et magnétiques est, cependant, originale et indique déjà la présence d'une pers -

pective générale dans ses recherches en physique, ainsi qu'une conception particulière du travail théorique dans cette discipline. Sa tâche sera — affirme Duhem dans la Préface — celle de "coordonner" et de "classer" les résultats de "recherches conçues d'après les idées les plus diverses ..."; de réaliser une "vaste synthèse" à travers un "exposé aussi un , aussi logique que possible des théories de l'Electricité et le Magnétisme et non pas une compilation de ces théories". Pour cela — dit-il — il va falloir séparer le "minerai" de la "gangue" à l'intérieur de cette science.

Ce travail de synthèse s'articulera autour de la Mécanique et de la Thermodynamique :

"... nous nous sommes convaincu que tout ce qu'il y a de clair et de fécond dans cette Science pouvait se grouper, avec beaucoup d'ordre et d'unité, autour de quelques principes empruntés à la Mécanique et à la Thermodynamique, et c'est ce groupement que nous avons essayé d'exposer".<sup>69</sup>

L'usage qu'il fera de "l'instrument thermodynamique" sera perceptible notamment dans l'exposition de la théorie de l'aimantation par influence, dont il emprunte les principes à Poisson et W. Thomson. Cette théorie sera alors transposée à l'étude des milieux diélectriques.

La seule théorie de Maxwell considérée par Duhem dans ses Leçons est celle de l'état de contrainte des milieux magnétiques et diélectriques :

"Le premier auteur qui ait cherché à préciser la nature des pressions qui s'exercent à l'intérieur d'un corps polarisé est Maxwell".<sup>70</sup>

Après la présentation des principes de la théorie de Maxwell et de ses équations pour les efforts à l'intérieur du milieu polarisé, il remarque :

"Cette théorie, fondée par Maxwell, développée par M. H. von Helmholtz, M. E. Lorberg et M. G. Kirchhoff, a été, nous l'avons dit, adoptée par presque tous les physiciens. Elle

n'est pas, cependant, sans présenter de graves causes de doute.

Les lois connues de l'hydrostatique enseignent qu'en un point d'un fluide, la pression est normale à l'élément mené par ce point et indépendante, en grandeur, de l'orientation de l'élément. D'après Maxwell, il n'en serait pas ainsi à l'intérieur d'un fluide polarisé: la pression qui s'exerce sur un élément normal aux lignes de force se changerait en tension pour les éléments parallèles aux lignes de force".<sup>71</sup>

Il cite alors un long extrait du Treatise où Maxwell se défend de cette critique,<sup>72</sup> ce que pour Duhem constitue une évidence que Maxwell lui-même avait vue la difficulté.

Duhem se réfère aussi aux critiques de Brillouin, Beltrami, Mathieu et Poincaré sur la théorie de Maxwell des pressions et tensions dans le milieu diélectrique. Mais il prétend aller plus loin, et "rejeter" cette théorie :

"Tous les auteurs éminents que nous venons de citer, en signalant les nombreuses difficultés de la théorie de Maxwell, regardent ces difficultés comme des paradoxes qui seront un jour expliqués et continuent à croire à la vérité de cette théorie. Aucun ne va jusqu'à regarder comme inexacte l'expression, donnée par le physicien anglais, des pressions au sein d'un milieu polarisé. C'est pourtant là la conclusion à laquelle nous nous arrêtons".<sup>73</sup>

La théorie de Maxwell présente non pas des "paradoxes" mais des "contradictions" :

"Au premier rang de ces contradictions, citons celle qui consiste à admettre, au sein d'un fluide, l'existence d'une pression qui n'est pas normale à l'élément sur lequel elle agit, ni indépendante de l'orientation de cet élément".

Et de plus cette théorie, dit Duhem, n'est pas conforme à l'expérience :

"L'expérience, d'ailleurs, nous laisse à l'aise pour rejeter la théorie de Maxwell. Elle a constaté, en effet, que les

corps polarisés se dilataient dans les directions normales aux lignes de force, ce qui s'accorde aussi bien avec notre théorie qu'avec celle de Maxwell; mais elle n'a jamais constaté la contraction dans le sens des lignes de force annoncée par la théorie que nous repoussons..."

Il conclut :

"Nous rejetterons donc complètement la théorie de Maxwell pour conserver uniquement la théorie, conforme aux principes de l'hydrostatique et de l'élastique, que nous avons développée dans les deux chapitres précédents".<sup>74</sup>

Duhem ne reviendra plus sur cette théorie de Maxwell dans ses écrits. Dans sa Notice de 1913 il se plaint, amèrement, que la théorie de Maxwell, malgré ses critiques, (...)

"... a continué d'être admise et enseignée sans discussion. On a tenté de la vérifier par l'expérience et, qui plus est, on croit y avoir réussi. La mode a ses raisons qui la raison ne connaît pas".<sup>75</sup>

Dans le troisième tome de ses Leçons, consacré à l'étude des courants linéaires, Duhem fera appel à l'expression du potentiel électrodynamique de Helmholtz. Dès la préface, il témoigne de son "admiration pour ceux qui ont le plus contribué, depuis vingt ans, aux progrès de l'Electrodynamique...", en se référant à Helmholtz et à C. Neumann.

Cependant, dans ce tome il ne sera pas question de la théorie de Helmholtz des conducteurs étendus, ni non plus de la théorie des milieux diélectriques. Duhem n'aborde pas, en effet, dans ses Leçons, la propagation d'ondulations électromagnétiques dans les milieux diélectriques et dans les conducteurs.

Dans la comparaison qu'il établit entre la "loi élémentaire de l'induction" de Helmholtz et celles proposées par d'autres savants, comme Weber, Clausius, etc., Duhem ne fait aucune mention à l'approche de Maxwell dans l'étude d'un système de circuits électriques. Il se limite à rejeter cette théorie dans une note :

"L'exposé de Maxwell renferme de graves erreurs qui ont été reproduites dans Mascart et Joubert et dans Jamin et Bouty".<sup>76</sup>

Après les Leçons Duhem continue à travailler sur la théorie de Helmholtz dans son mémoire "Sur les lois générales de l'induction électrodynamique" (1893) . L'objectif de cet article est de fournir une démonstration des formules pour l'induction électromagnétique données par Helmholtz dans son mémoire<sup>77</sup> de 1874. Il y fait usage d'une méthode développée dans ses Leçons.

Cette même année et l'année suivante, Duhem publie les deux parties de son mémoire "Les actions électrodynamiques et électromagnétiques", où il étudie les actions entre des corps conducteurs. Son objectif est toujours de perfectionner la théorie de Helmholtz:

"Les résultats auxquels nous parviendrons seront en complet accord avec ceux qu'a formulés, parfois presque sans démonstration, M. H. von Helmholtz. Si nos études contribuent à faire partager au lecteur l'admiration que nous inspire l'oeuvre de l'illustre physicien, notre but sera atteint".<sup>78</sup>

En 1896 Duhem donne suite à son projet, en considérant les milieux diélectriques :

"On sait que l'électrodynamique des milieux diélectriques, telle que Maxwell l'a esquissée, repose sur des hypothèses incompatibles avec les théories classiques de l'électricité, ce qui porte un grand nombre de physiciens à abandonner ces théories.

Helmholtz a tenté de rattacher l'électrodynamique des milieux diélectriques aux doctrines traditionnelles; toutefois ses équations ne semblent pas conformes à certaines lois énoncées par Maxwell et vérifiées par l'expérience. Notre but est de continuer l'oeuvre de Helmholtz et de montrer comment toutes les lois expérimentalement vérifiées qui découlent des idées de Maxwell, peuvent être également déduites d'une méthode qui ne brise pas la tradition".<sup>79</sup>

Les deux mémoires que Duhem publie à ce sujet sont issus directement de la critique dont la théorie de Maxwell avait fait l'objet dans

un article daté de 1894: "Quelques remarques au sujet de l'électrodynamique des corps diélectriques proposée par J. C. Maxwell". Nous attribuons à cet article un rôle central dans la définition du programme Duhemien dans le domaine de l'électromagnétisme, en dépit du fait qu'il ne figure pas dans la Notice de 1913. Il mérite, nous le croyons, une analyse approfondie.

#### SECTION VI.6- LA CRITIQUE DE 1894 DES THEORIES DE MAXWELL

L'objectif de Duhem dans l'article de 1894 est d'accorder la théorie de Helmholtz — fondée sur la théorie "classique" des diélectriques (théorie de Poisson-Mossotti) — avec certaines conséquences de la théorie de Maxwell qui, d'après Duhem, avaient été confirmées par l'expérience de Hertz de 1888.

Vu ainsi cet article ne paraît présenter aucune originalité: Helmholtz lui-même, dès 1870, avait établi les "conditions de passage" de sa théorie à celle de Maxwell, laquelle ne serait alors qu'un cas "particulier" ou "limite" de la première. Nous avons également reporté, dans le chapitre précédent, la révision qui a été entreprise par Poincaré de ces conditions de passage posées par Helmholtz, avec l'objectif d'interpréter les résultats des expériences de Hertz.

L'originalité de Duhem sera d'éliminer ce passage par la théorie de Maxwell, une démarche qui était implicite à toutes les tentatives

antérieures d'approche de la question.

Duhem met en évidence le fait que toutes ces tentatives avaient presupposé ce qu'il appelle "l'hypothèse de Faraday-Mossotti", exprimée par la condition  $\mathcal{E} \rightarrow \infty$ , où  $\mathcal{E}$  est un coefficient qui figure dans l'expression pour la force Coulombienne. Or, Duhem va soutenir l'innacceptabilité de cette condition.

En deuxième lieu, il cherchera à montrer que la théorie de Maxwell, quoique en accord avec les résultats des expériences de Hertz, est "contradictoire" et ne peut donc pas être admise.

Duhem proposera alors une modification dans la théorie de Helmholtz de façon à la rendre compatible avec ces résultats expérimentaux.

L'intérêt que nous portons à l'article de 1894 concerne sur tout la démarche utilisée par Duhem pour prouver ses principales thèses. Elle va mettre en oeuvre une interprétation particulière des théories de Maxwell, qui restera une constante tout au long des recherches de Duhem.

Duhem interprète les conceptions de Faraday et les théories de Maxwell à partir de la théorie "classique" des diélectriques de Poisson-Mossotti. C'est le premier presupposé méthodologique de l'article. Duhem n'adopte pas un point de vu "interne" dans ses analyses de Faraday et de Maxwell, mais il fait appel à une théorie étrangère à l'univers conceptuel de ces savants. Nous verrons, dans la discussion de l'ouvrage Les théories électriques de J. C. Maxwell (1902), ce qui, aux yeux de Duhem, donne légitimité à cette démarche.

Le deuxième presupposé méthodologique de l'article est l'interprétation Hertzienne du concept de charge électrique chez Maxwell. Hertz dans l'introduction à son ouvrage Untersuchungen ueber die Ausbreitung der elektrischen Kraft, publié en 1892, a analysé quatre "modes de représentation" de la théorie de Maxwell, dont celle qu'il croit être fidèle aux conceptions du savant écossais. Hertz attribue de cette façon à Maxwell, la conception selon laquelle toute électricité est l'effet d'un processus: la polarisation diélectrique. D'après les trois premières de ces représentations, l'électricité est à l'origine de forces agissantes à distance et se localise dans les conducteurs. Selon Hertz le seul moyen d'interpréter Maxwell d'une façon consistante correspond à poser que

l'électricité, sous cette forme, n'existe pas.

Que fait Duhem? Il va prendre à la lettre cette représentation de la théorie de Maxwell et il supposera que l'électricité sur les conducteurs est toujours nulle dans cette théorie.

Toutes les conclusions auxquelles Duhem arrive en 1894 par rapport à la théorie de Maxwell reposent, donc, sur l'adoption de la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti et sur l'interprétation de Hertz du concept de charge électrique chez le savant écossais.

Nous sommes convaincus que la critique des théories de Maxwell entreprise dans l'article de 1894 va légitimer, sur le plan scientifique, le choix qui fera Duhem en faveur du programme de Helmholtz. Il nous semble donc important d'analyser sur le bien fondé de ses thèses.

#### Charges "Réelle" et "Fictive" chez Faraday et chez Maxwell

La première partie de l'article est une exposition de la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti, semblable à celle donnée par Mathieu.

Nous avons vu dans le chapitre 4 comment Mathieu a mis en évidence une incompatibilité entre la conception Maxwellienne de la charge électrique et celle qui découle de la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti. D'une façon semblable, Duhem va porter à la lumière la contradiction existante entre "l'idée particulière de Faraday" et cette dernière théorie. Duhem insiste sur le fait que la relation :

$$E + \sigma = 0 \quad (1)$$

(où  $E$  est la densité "réelle" de charge sur les conducteurs, et  $\sigma$  la densité "fictive" sur le diélectrique contigüe) est l'expression, en langage mathématique, d'une idée de Faraday.<sup>80</sup>

Duhem, de la même façon que Mathieu, montre que la théorie

de la polarisation diélectrique prévoit un résultat différent:

$$4\pi\epsilon KE + (1 + 4\pi\epsilon K) \sigma = 0 \quad , \quad (2)$$

où  $\epsilon$  est un coefficient associé à la force de Coulomb dans un milieu impolarisable idéal et  $K$  est le coefficient de polarisation diélectrique.<sup>81</sup>

L'équation (1) est la forme limite de l'équation (2) quand  $\epsilon K \rightarrow \infty$ . Duhem affirme alors que la théorie des diélectriques de Faraday est une forme limite de la théorie de Poisson-Mossotti. L'originalité de Duhem consistera dans le fait de mettre en évidence les différences entre les "théories" de Faraday et de Maxwell, en les comparant à la théorie de Helmholtz:

"H. von Helmholtz a proposé de considérer spécialement le cas où  $\epsilon K$  devient infini pour tous les diélectriques; il a montré que, dans ce cas limite, ses formules électrodynamiques s'identifiaient avec celles de Maxwell; on voit que ce cas limite de la théorie de Helmholtz n'est autre chose que la théorie de Faraday".<sup>82</sup>

Duhem s'efforcera de montrer, effectivement, que "l'idée particulière de Maxwell" est différente de celle de Faraday. Il s'appuyera pour cela sur les analyses de Hertz. Duhem interprète le 4<sup>ème</sup> "mode de représentation" qui offre Hertz de la théorie de Maxwell dans ces termes:

"Il n'y a pas d'électricité. Le rôle attribué, dans l'interprétation des expériences, à la couche électrique recouvrant un conducteur doit être attribué à la couche fictive qui recouvre la surface du diélectrique contigu à ce conducteur".<sup>82</sup>

Nous verrons que Duhem n'est pas tout à fait fidèle aux propos de Hertz puisqu'il traduit l'interprétation que donne ce savant de la théorie de Maxwell à partir de la grille conceptuelle de la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti. Nous reviendrons là-dessus.

Faraday aurait fait, selon Duhem, une distinction entre la couche fictive et la couche réelle de charge — tout en affirmant l'égalité de la valeur absolue des deux densités — tandis que Maxwell aurait

tout simplement éliminé la couche réelle.<sup>83</sup>

Par la suite Duhem appliquera les "idées" de Faraday et de Maxwell à deux "problèmes" en électrostatique:

"Bien que l'idée essentielle de Maxwell soit, pour ainsi dire, l'inverse de l'idée de Faraday, ces deux idées conduisent aux mêmes résultats lorsqu'on les applique à deux problèmes qui vont jouer, dans la suite de ce travail, un rôle capital: le problème du condensateur et le problème des lois de Coulomb".<sup>84</sup>

De la solution donnée à ces deux "problèmes" dépendra l'analyse de certains résultats concernant la propagation des perturbations électromagnétiques.

#### Le Problème du Condensateur et le "idées" de Faraday et de Maxwell

Duhem applique, d'une façon semblable à Mathieu, la théorie de Poisson-Mossotti à l'étude des condensateurs. Si  $U$  est la fonction potentielle totale (relative aux distributions de charge "réelle" sur les conducteurs et à la polarisation du diélectrique), alors la charge électrique réelle  $Q$  sur l'armature du condensateur sera exprimée, d'après Duhem, par :

$$Q = A \frac{1 + 4\pi\epsilon K}{4\pi} U \quad , \quad (3)$$

où  $A$  est une constante qui dépend uniquement de la géométrie du condensateur.

La capacité du condensateur serait, donc, dans la théorie de Poisson-Mossotti :

$$C = \frac{Q}{\epsilon U} = A \frac{1 + 4\pi\epsilon K}{4\pi\epsilon} \quad (4)$$

Le pouvoir inducteur spécifique d'un diélectrique est défini à

partir de la mesure du rapport entre les capacités de deux condensateurs géométriquement identiques, mais ayant des diélectriques différents. Ce rapport est, d'après l'expression (4) :

$$\frac{C'}{C} = \frac{1 + 4\pi\epsilon K'}{1 + 4\pi\epsilon K} \quad (5)$$

Ce rapport ne dépend que de la nature des deux diélectriques. Le pouvoir inducteur spécifique d'un diélectrique de constante diélectrique  $K$  peut donc être défini par l'expression :

$$\frac{1 + 4\pi\epsilon K}{\epsilon} \quad (6)$$

Dans un milieu impolarisable nous avons que  $K=0$ . Le pouvoir inducteur spécifique de ce milieu sera donc :

$$1/\epsilon \quad (7)$$

"L'idée de Faraday", d'après Duhem, consiste à faire  $\epsilon K \rightarrow \infty$ . Cette condition appliquée à l'agilité (5) conduit au résultat :

$$\frac{C'}{C} = \frac{K'}{K} \quad (8)$$

Duhem fait la remarque que dans la théorie de Faraday la capacité du condensateur est donnée par  $C=KA$ , ce qui impose une valeur finie à  $K$ . "L'hypothèse de Faraday-Mossotti" peut toujours être satisfaite si l'on fait uniquement  $\epsilon \rightarrow \infty$  et si l'on maintient  $K$  fini. Cette condition appliquée à l'expression (6) conduit au pouvoir inducteur d'un diélectrique selon "l'idée de Faraday" :

$$4\pi K \quad (9)$$

"L'idée de Maxwell" correspond à rendre la charge réelle toujours égale à zéro. La capacité d'un condensateur sera donnée alors par :

$$\gamma = \frac{q}{\epsilon U} \quad (10)$$

où  $q$  est la charge fictive équivalente à la polarisation du diélectrique. On peut écrire<sup>85</sup> en utilisant l'équation (4) :

$$\gamma = \frac{q}{Q} C \quad (11)$$

Mais Duhem avait obtenu auparavant (éq. 2) le rapport entre les deux types de charge :

$$\frac{q}{Q} = \frac{\sigma}{E} = - \frac{4\pi\epsilon K}{1 + 4\pi\epsilon K}$$

Nous pouvons donc écrire, d'après l'équation (11) :

$$\gamma = - \left( \frac{4\pi\epsilon K}{1 + 4\pi\epsilon K} \right) C \quad (12)$$

D'après "l'idée de Maxwell" le rapport entre les capacités de deux condensateurs ayant des diélectriques différents sera donc identique à celui obtenu d'après "l'idée de Faraday":

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{K'}{K} \quad (13)$$

Nous avons utilisé les équations (12) et (5) pour obtenir ce résultat.

Cet accord avec la théorie de Faraday conduit alors Duhem à affirmer que dans la théorie de Maxwell, le pouvoir inducteur spécifique d'un diélectrique sera, par analogie avec l'expression (9):

$$- 4\pi K \quad (14)$$

#### Discussion des Développements de Duhem sur le Problème du Condensateur

Les développements de Duhem que nous venons de rapporter sont déconcertants à plusieurs égards.

D'abord il faut remarquer que Duhem fait appel à la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti, comme si elle avait été admise par Faraday et Maxwell (qui auraient seulement adjoint, à cette théorie, des conditions supplémentaires). Ainsi Duhem utilise systématiquement l'expression "théorie de Faraday" pour la conjonction entre cette théorie des diélectriques et la condition  $\epsilon \rightarrow \infty$ . De la même façon, la "théorie de Maxwell" est présentée comme le produit de la conjonction de cette même théorie des diélectriques et de l'interprétation de Hertz de la notion d'électricité chez le savant écossais.

Or, cette approche de Duhem est sûrement illégitime. Ce que Duhem appelle "l'hypothèse de Faraday-Mossotti" est une interprétation de certaines affirmations de Faraday dans la onzième série de ses

Experimental Researches on Electricity. Il serait sûrement abusif d'affirmer que Faraday y expose une "théorie" des diélectriques. Encore plus d'imputer à Faraday la théorie des diélectriques élaborée par Mossotti à partir de la théorie du magnétisme par influence de Poisson. Nous discutons cette question d'une façon approfondie dans l'Appendice A.

En ce qui concerne Maxwell, il est sûr qu'il n'a pas voulu adopter dans le Treatise, la théorie de la polarisation diélectrique, ainsi que nous l'avons soutenu dans le chapitre précédent. Hertz n'aurait pas, non plus, cautionné la démarche de Duhem. S'il est vrai que Hertz attribue à Maxwell l'idée que toute charge est le résultat de la polarisation du diélectrique, il signale, tout de même, qu'il est strictement impossible de voir la théorie du savant écossais comme une forme limite de la théorie classique des diélectriques (et de la charge).

Duhem fait donc ici un amalgame entre la troisième et la quatrième représentations de la théorie de Maxwell, exposées par Hertz en 1892. Nous verrons par la suite jusqu'où Duhem va pousser cet amalgame.

Une dernière remarque concerne l'équation (10), que Duhem attribue à Maxwell. Or, si l'on accepte avec Duhem qu'il n'y a pas de distribution réelle de charge chez Maxwell, alors il faudrait non pas utiliser dans cette équation le potentiel électrostatique total, mais uniquement le potentiel de polarisation. On arriverait alors à des résultats tout à fait différents. Nous verrons dans la discussion du "problème de la loi de Coulomb" que Duhem va justement critiquer "l'incohérence" de Maxwell qui ne s'est pas limitée, selon lui, au seul usage du potentiel de polarisation.

#### Le Problème de la Loi de Coulomb et les "Idées" de Faraday et de Maxwell

Duhem montre que dans la théorie de Helmholtz deux corps por -

portant des charges réelles  $Q$  et  $Q'$ , placés dans un milieu ayant un coefficient de polarisation  $K$ , subissent une force mécanique donnée par :

$$F = \frac{\epsilon}{1 + 4\pi\epsilon K} \frac{Q Q'}{r^2} \quad (15)$$

Le coefficient de la force Coulombienne est donc l'inverse du pouvoir inducteur spécifique du milieu d'après l'expression (6).

Dans un milieu implarisable idéal, où  $K=0$ , cette action sera donnée par :

$$F = \epsilon \frac{Q Q'}{r^2} \quad (16)$$

La "théorie de Faraday" est obtenue en imposant la condition  $\epsilon \rightarrow \infty$  à la théorie de Poisson-Mossotti. Duhem impose cette même condition à la théorie de Helmholtz et il obtient, à partir de l'équation (15) :

$$F = \frac{1}{4\pi K} \frac{Q Q'}{r^2} \quad (17)$$

La "théorie de Faraday" prévoit donc, d'après (16), que dans un milieu impolarisable idéal cette action mécanique serait infinie.

"L'idée de Maxwell" est, selon Duhem, qu'il ne faut admettre que l'existence des charges fictives dues à la polarisation diélectrique. Les actions mécaniques dans un système de conducteurs "electrisés" ( ce terme recevant la signification que lui confère cette "idée") seraient calculables, donc, uniquement à partir d'un potentiel de polarisation. Dans cette hypothèse l'action entre deux "charges" serait indépendante de la nature du diélectrique où elles sont plongées.<sup>86</sup>

Duhem signale cependant que Maxwell n'est pas tout à fait cohérent avec son "idée", et qu'il admet, à la place du potentiel de polarisation, le potentiel associé aux distributions de charge réelles:

$$\Psi = \frac{\epsilon}{1 + 4\pi\epsilon K} \sum \frac{Q'}{r} \quad (18)$$

Mais comme d'après l'équation (2) :

$$q' = - \frac{4\pi\epsilon K}{1 + 4\pi\epsilon K} Q'$$

il vient :

$$\Psi = - \frac{1}{4\pi K} \sum \frac{q'}{r} \quad (19)$$

Duhem conclut que, d'après Maxwell, "les actions entre corps conducteurs plongés dans un milieu diélectrique sont les mêmes que si

deux charges fictives  $q$  et  $q'$ , situées à la distance  $r$ , se repoussaient avec une force<sup>87</sup> :

$$F = - \frac{qq'}{4\pi Kr^2} \quad (20)$$

Ce résultat est compatible avec celui de la "théorie" de Faraday (équation 17), si l'on admet l'idée — que Duhem attribue à ce dernier — selon laquelle  $Q = -q$  (voir équation 1).

Les commentaires que nous avons à faire sur ces développements sont essentiellement les mêmes que pour le "problème du condensateur". Duhem attribue le formalisme de la théorie de Helmholtz à Maxwell et, par l'introduction de la représentation que donne Hertz de la théorie de ce dernier, il dérive le résultat (20). Ensuite, il le compare avec ceux obtenus à partir de la même théorie de Helmholtz en introduisant la condition  $\mathcal{E} \rightarrow \infty$  (ce que Duhem appelle la "théorie de Faraday", si l'on se limite à l'électrostatique).

Ce qui nous paraît étonnant, c'est que Duhem lui-même semble dire que "l'idée de Maxwell" n'est pas tout à fait applicable aux théories du même Maxwell. Ainsi il admet que, chez Maxwell, il y a un potentiel associé aux distributions "réelles" de charge (équation 18).

Malgré toutes ces manipulations pas très convaincantes, Duhem tire des conséquences qui sont, à notre avis, déterminantes pour la définition du programme scientifique qu'il développera jusqu'aux derniers de ses écrits en la matière.

L'Electrodynamique de Helmholtz et les "idées" de  
Faraday et de Maxwell

Duhem pose initialement les expressions pour les vitesses de

propagation des flux de déplacement transversaux ( $V_T$ ) et longitudinaux ( $V_L$ ) dans les milieux diélectriques, prévues par l'électrodynamique de Helmholtz. La solution du problème du condensateur va lui permettre, par la suite, d'obtenir une expression pour le rapport entre les unités électrostatique et électrodynamique de charge d'après cette même théorie. Il montrera alors, que seulement en faisant appel à l'idée de Faraday ou à celle de Maxwell, la théorie de Helmholtz peut être rendue compatible avec l'expérience.

Dans sa déduction des vitesses de propagation des flux de déplacement, Helmholtz suppose, comme souligne Duhem, que l'expression du potentiel électrodynamique s'applique aussi bien aux courants de conduction qu'aux courants de déplacement. Nous verrons plus loin que Duhem ne considère pas cette hypothèse comme "forcée". En l'admettant, en tout cas, Helmholtz arrive aux expressions<sup>88</sup> :

$$V_L = \frac{\sqrt{1 + 4\pi\epsilon K}}{A\sqrt{2\pi K \lambda}} \quad (21)$$

$$V_T = \frac{1}{A\sqrt{2\pi K}} \quad (22)$$

où  $A$  est le coefficient du potentiel électrodynamique et  $\lambda$  est le paramètre de Helmholtz.<sup>89</sup>

Duhem montre qu'on peut déterminer expérimentalement en utilisant un condensateur ayant comme milieu isolant le vide, le rapport entre deux quantités,  $g$  et  $g'$  qui, selon la théorie de Helmholtz, sont données par les expressions :

$$\left. \begin{aligned} g &= \frac{\epsilon Q^2}{1 + 4\pi\epsilon K_0} \\ g' &= \frac{A^2}{2} Q^2 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Ces mêmes grandeurs seront exprimées, selon "l'idée de Maxwell", par les expressions :

$$\left. \begin{aligned} g &= \frac{Q'^2}{4\pi K_0} \\ g' &= \frac{A^2}{2} Q'^2 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Duhem a ici fait appel aux solutions différentes données, dans

ces deux "théories", au problème du condensateur.

On pourra alors écrire :

$$\frac{g}{g'} = \frac{\epsilon}{A^2/2} \frac{1}{1+4\pi\epsilon K_0} \quad (\text{HELMHOLTZ}) \quad (25)$$

et

$$\frac{g}{g'} = \frac{1}{A^2/2} \frac{1}{4\pi K_0} \quad (\text{MAXWELL}) \quad (26)$$

La "théorie de Faraday" correspond à faire  $\epsilon \rightarrow \infty$  dans les expressions (23). On arrive ainsi au même résultat que la "théorie de Maxwell" pour ce rapport (équation 26).

L'expérience permet de déterminer ce rapport: il est égal au carré de la vitesse de la lumière ( $V$ ) dans le vide.<sup>90</sup>

Une simple comparaison entre l'expression pour la vitesse de propagation  $V_t$  des ondes transversales dans le vide ( $K=K_0$ ), et le rapport  $g/g'$  donné par l'expression (26) permet d'obtenir le résultat :

$$V_{T_0} = V \quad (27)$$

Duhem conclut alors :

"Dans la théorie de Faraday et dans la théorie de Maxwell, les ondes électromagnétiques transversales se propagent dans le vide avec la même vitesse que la lumière".<sup>91</sup>

Duhem considère cette conséquence confirmée par les expériences de Hertz. Il l'appellera, par la suite, la "première loi de Maxwell".

La théorie de Helmholtz conduit, par contre, au résultat :

$$V_{T_0} > V \quad (28)$$

Un des objectifs qui se posera Duhem sera de rendre compatible la théorie de Helmholtz avec le résultat (27) des expériences de Hertz.

La "deuxième loi de Maxwell" peut être déduite de la façon suivante. L'indice de réfraction pour une onde électromagnétique qui passe de l'éther à un diélectrique est défini par :

$$n = V_{T_0}/V_T \quad (29)$$

On peut donc écrire, en utilisant l'expression pour la vitesse d'une onde transversale obtenue par Helmholtz :

$$n = \sqrt{K/K_0} \quad (30)$$

La solution du problème du condensateur a montré que, d'après les idées de Faraday et de Maxwell, le pouvoir inducteur d'un diélectrique par rapport au vide est :

$$D = K/K_0 \quad (31)$$

La théorie de Helmholtz, comme nous l'avons vu, prévoit un tout autre résultat (équation 5).

Duhem conclut que dans les théories de Faraday et de Maxwell le résultat suivant est valable :

$$n^2 = D \quad (32)$$

C'est l'expression mathématique de ce qu'il appellera la "deuxième loi de Maxwell".

Duhem ne croit pas, toutefois, à cette époque, que le résultat (32) ait reçu une confirmation expérimentale.

Il s'agira ainsi pour lui, de faire concorder la théorie de Helmholtz avec la "première loi de Maxwell" (confirmée par les expériences de Hertz) sans faire appel, toutefois, ni à l'idée de Faraday ni à celle de Maxwell. L'une et l'autre seront, effectivement, rejetées par Duhem dans la suite de son mémoire.

#### Le Caractère Contradictoire de la Théorie de Maxwell selon Duhem

Duhem considère la "première loi de Maxwell" comme établie.<sup>92</sup> Il se garde, toutefois, de faire le même jugement en ce qui concerne l'ensemble de la théorie: "... il s'en faut bien qu'il en soit de même des idées théoriques sur lesquelles elle repose", dit-il. Duhem examinera alors, la "théorie de Maxwell" d'un côté, d'où découle naturellement cette loi et "l'idée de Faraday" d'un autre côté, qui permet de

faire concorder la théorie de Helmholtz avec ce résultat.

Duhem va rejeter chacune de ces deux options théoriques. Il essaiera de montrer que la "théorie de Maxwell" est "contradictoire" et que la "théorie de Faraday" est "incompatible avec l'expérience".

Duhem va soutenir qu'on peut déduire de la théorie de Maxwell la conséquence que le déplacement électrique est identiquement égal à zéro, en toute circonstance. Ce résultat est en contradiction, sans aucun doute, avec la théorie du déplacement électrique de Maxwell.

Il offre deux preuves de cette contradiction. Dans la première il utilise les équations et les notations de Maxwell lui-même.

Dans la deuxième il utilise la théorie de Poisson-Mossotti pour "montrer le point précis où, dans la théorie de Maxwell, s'introduit la contradiction".

Dans la première preuve Duhem interprète systématiquement les densités superficielles de charge, dans les équations valables pour la surface de séparation entre deux milieux homogènes, comme des densités de charge fictive. Or cela n'est sûrement pas légitime surtout quand il est question de la surface de séparation entre un milieu conducteur et un diélectrique. Les plus déconcertant est que Duhem fait appel à une équation de l'ouvrage Electricité et Optique où il est justement question d'une densité superficielle de charge réelle sur le conducteur.<sup>93</sup>

Dans la deuxième preuve Duhem fait  $E=0$  partout où cette grandeur apparaît, ce qui équivaut à dire dans la théorie de Poisson-Mossotti qu'il n'existe pas de distribution réelle de charge.

Duhem est explicite, d'ailleurs, en ce qui concerne l'origine de la contradiction soulevée :

"La contradiction s'introduit donc, dans la théorie de Maxwell, par ce qui fait le caractère essentiel de cette théorie: l'hypothèse qu'il n'existe pas d'autre électrisation que l'électrisation fictive équivalente à la polarisation diélectrique".<sup>94</sup>

La "preuve" du caractère contradictoire de la théorie de Maxwell, que nous offre Duhem, n'est cependant pas admissible. Maxwell

n'aurait pas admis l'élimination pure et simple de toute électrisation "réelle" des conducteurs. Duhem lui-même a admis, plus haut, dans la solution du problème de la loi de Coulomb, que Maxwell suppose une fonction potentielle des distributions de charge réelle. Même Hertz affirme que "Maxwell admet que l'électricité existe aussi dans les conducteurs ...",<sup>95</sup> ce qui empêche, selon lui, d'attribuer le 4<sup>ème</sup> mode de représentation à Maxwell d'une façon entièrement consistante :

"... I must admit — dit-il — that I have not succeeded in doing this completely, or to my entire satisfaction; otherwise, instead of hesitating, I would speak more definitely".<sup>96</sup>

Cette conclusion a conduit Hertz à abandonner l'architecture théorique de Maxwell et à ne retenir que ses équations.

Duhem, qui n'admettra pas l'approche de Hertz, soulève des difficultés qui sont en fait introduites par sa propre interprétation de la théorie du savant écossais.

En ce qui concerne la "théorie de Faraday", Duhem signale qu'il n'y a pas de "contradiction logique" à faire  $\epsilon \rightarrow \infty$  dans la théorie classique des diélectriques. Donc, "l'expérience seule — dit-il — (...) peut nous amener à rejeter la théorie de Faraday".

Duhem montre qu'en imposant la condition  $\epsilon \rightarrow \infty$ , on arrive à la conclusion que les actions entre corps conducteurs et diélectriques ne dépendent pas de la nature de ces corps diélectriques (déterminée par la valeur de la constante K). Ce résultat n'étant pas conforme à l'expérience, Duhem en conclut que :

"La constante E ne peut être ni infinie, ni extrêmement grande; la théorie de Faraday ne peut être vraie ni exactement, ni approximativement".<sup>97</sup>

Les "idées" de Maxwell et de Faraday étant rejetées, la première par des critères logiques, et la deuxième par des critères empiriques, il ne restera à Duhem que l'option de modifier la théorie de Helmholtz de façon à ce qu'elle comporte la "première loi de Maxwell" comme une de ses conséquences.

#### La Modification de la Théorie de Helmholtz

Duhem résume l'enjeu de la façon suivante :

"L'expérience rend très probable que la vitesse de propagation des courants de déplacement transversaux dans l'éther est égale à la vitesse même de la lumière. Si l'on admet les hypothèses de Maxwell touchant les courants de déplacement, il est impossible de retrouver cette égalité, à moins que l'on n'adopte en même temps, soit l'idée de Maxwell, soit l'idée de Faraday, touchant la polarisation des diélectriques. Or, ni l'idée de Maxwell, ni l'idée de Faraday, ne sont acceptables; la première est logiquement contradictoire; la seconde est contraire à l'expérience. Nous sommes donc nécessairement conduits à modifier en quelque point les hypothèses de Maxwell touchant les courants de déplacement".<sup>98</sup>

L'hypothèse de Maxwell à laquelle Duhem fait référence c'est l'équivalence entre les courants de déplacement et les courants de conduction. Duhem propose de changer le rapport de cette équivalence, supposé aussi bien par Maxwell que par Helmholtz égal à 1. Il écrira, au contraire :

$$u = \theta \varphi, \quad v = \theta \psi, \quad w = \theta \chi, \quad (33)$$

où  $(u, v, w)$  sont les composantes du courant de conduction et  $(\varphi, \psi, \chi)$  celles du courant de déplacement. La constante d'équivalence  $\theta$  est supposée plus grande que l'unité.

Cette modification est légitime du point de vue de l'épistémologie Duhemienne :

"... les flux de déplacement sont des grandeurs que nous introduisons en physique par un procédé logique analogue à celui qui a fait considérer les flux de conduction; mais, entre ces deux espèces de grandeurs, il n'y a aucune parenté de nature".

Duhem considère qu'il n'y a "rien de forcé" dans l'identification établit par Maxwell entre "flux de déplacement" et "flux électrique". Les nouvelles grandeurs sont introduites en physique par un procédé purement logique. La décision méthodologique d'introduire une nouvelle grandeur ne peut être jugée qu'à l'intérieur d'une structure théorique, en comparant les conséquences testables de la théorie avec l'expérience.

A partir de la modification du rapport d'équivalence entre le courant de déplacement et le courant de conduction, Duhem montre qu'on arrive aux équation suivantes pour les vitesses des ondes longitudinales et transversales dans un milieu diélectrique :

$$V_L = \frac{\sqrt{2\varepsilon'}}{\theta A} \frac{\sqrt{1+4\pi\varepsilon'K'}}{\sqrt{4\pi\varepsilon'K\lambda'}} \quad (34)$$

$$V_T = \frac{1}{\theta A \sqrt{2\pi K'}} \quad (35)$$

Le rapport  $g/g'$  continue à être exprimé, dans cette théorie, par l'égalité (25). L'expérience exige, comme auparavant, que l'on ait :

$$V_{T_0} = \sqrt{g/g'} \quad (36)$$

Comme  $\theta$  a une valeur arbitraire, Duhem fait :

$$\theta = \sqrt{\frac{1+4\pi\varepsilon'K_0}{4\pi\varepsilon'K_0}} \quad , \quad (37)$$

ce qui permet d'obtenir l'égalité (36) sans admettre ni "l'idée de Maxwell", ni celle de Faraday.

Duhem signale aussi que l'égalité (37) peut être compatible a avec la condition : " $\varepsilon'K_0$  très petit" (ce qui lui semble être une exigence expérimentale). Pour cela il faut admettre que  $\theta$  puisse avoir une grande valeur, ce qui ne gêne pas Duhem :

" il suffit (...) qu'un flux de déplacement d'intensité finie équivaille à un flux de conduction extrêmement intense".<sup>99</sup>

Duhem affirme, pour conclure, qu'avec cette modification il résout le dilemme associé à l'adoption de la "théorie de Maxwell" :

"On ne peut donc, avec Maxwell, admettre à la fois les deux égalités  $V_{\tau_0} = V$ ,  $\Theta = 1$ , à moins d'admettre en même temps l'égalité  $\epsilon K_0 = \infty$ , qui découle des idées de Faraday et qui, nous l'avons vu, est contredite par l'expérience".<sup>100</sup>

#### Résumé du Mémoire de 1894

En résumé il y a deux aspects fondamentaux de l'article de Duhem de 1894 qui méritent d'être relevés.

D'abord nous y trouvons une interprétation de la théorie de Maxwell qui est complètement étrangère au formalisme de cette théorie et à ses hypothèses de base. Duhem a probablement vu dans les analyses de Hertz, un moyen d'appliquer le formalisme de la théorie de Helmholtz à l'interprétation de la théorie de Maxwell. Il en est résulté des analyses auxquelles aucun de ces trois savants ne pourrait souscrire.

Deuxièmement — et c'est la partie crédible et originale de l'article — nous voyons Duhem prendre la décision de rendre compatible la théorie de Helmholtz avec le résultat des expériences de Hertz, sans utiliser les solutions classiques. Il va ainsi rejeter "l'hypothèse de Faraday-Mossotti" et, d'une façon plus fondamentale, toute solution qui accorde implicitement une valeur quelconque à la théorie de Maxwell. Effectivement, cette hypothèse aboutissait à faire de cette dernière théorie un cas particulier (ou limite) de la théorie de Helmholtz.

Duhem empruntera une voie originale, que nous allons suivre dans la prochaine section.

## SECTION VI.7-LA THEORIE DE HELMHOLTZ ET L'EXPERIENCE

Duhem a consacré plusieurs mémoires à l'interprétation des expériences sur la propagation des ondes électromagnétiques à partir de la théorie de Helmholtz. Il a fait aussi quelques tentatives pour obtenir une théorie électromagnétique de la lumière dans cette perspective théorique.

En 1895 Duhem publie un mémoire "Sur l'interprétation des expériences Hertziennes"<sup>101</sup> où il va utiliser comme théorie interprétative l'électrodynamique de Helmholtz, à laquelle il a apporté la modification suggérée dans le mémoire de 1894. Il suppose donc des constantes différentes pour le potentiel électrodynamique des courants de conduction et de déplacement<sup>102</sup>: respectivement A et C. Dans l'électrodynamique de Helmholtz il était supposé que A=C. Duhem suppose au contraire, comme en 1894, que :

$$\theta = \frac{A}{C} \quad , \quad (38)$$

et laisse la valeur de  $\theta$  indéterminée au départ.

Duhem arrive, de cette façon, aux mêmes expressions<sup>103</sup> pour les vitesses de propagation des ondulations électromagnétiques longitudinales et transversales de l'article de 1894. La seule différence est qu'ici Duhem prend en considération les propriétés magnétiques du milieu (caractérisées par le paramètre  $f$ , le "coefficient d'aimantation")<sup>104</sup> Nous reprenons ici ces équations :

$$V_L = \sqrt{\frac{\epsilon}{C^2/2} \frac{1}{\lambda} \frac{1+4\pi\epsilon K}{4\pi\epsilon K}} \quad (39)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{\epsilon}{C^2/2} \frac{1}{(1+4\pi f)(4\pi\epsilon K)}} \quad (40)$$

Duhem va considérer, en 1895, la propagation des flux de conduction longitudinaux dans des conducteurs parfaits (de résistance négligeable). Leur vitesse est donnée, selon la théorie de Helmholtz, par :

$$V_{CL} = \sqrt{\frac{\epsilon}{A^2/2} \frac{1}{\lambda}} \quad (41)$$

Dans cet article Duhem fera appel non seulement à l'expérience de Hertz et à la mesure du rapport  $q/q'$  (comme dans l'article de 1894) mais aussi aux expériences de Blondlot<sup>105</sup> et de Sarrazin et De La Rive. Il s'agira, avec les informations apportées par ces expériences, de faire ressortir la "signification physique" des paramètres  $\theta$  (introduit par lui) et  $\lambda$ .

Le rapport entre les unités de charge, donné par l'équation (25) de l'article de 1894, sera reprise ici en incluant un facteur qui se rapporte à la perméabilité magnétique du milieu :

$$v = \sqrt{\frac{\epsilon}{A^2/2} \frac{1}{(1+4\pi\epsilon K_0)(1+4\pi f_0)}} \quad (42)$$

Ce rapport — affirme Duhem — "ne diffère de la vitesse  $V$  de la lumière dans le vide que d'une quantité qui est de l'ordre des erreurs d'expérience".<sup>106</sup> On peut donc écrire que :

$$v = V \quad (43)$$

Les expériences de Blondlot permettent à leur tour d'affirmer que "la vitesse de propagation des flux longitudinaux dans un conducteur sensiblement parfait est égale à la vitesse de la lumière dans le vide".

L'expression symbolique de ces deux résultats expérimentaux est :

$$V_{CL} = V \quad (44)$$

En faisant appel aux égalités (43) et (44), Duhem détermine la "valeur théorique" du paramètre  $\lambda$  à partir des équations (41) et (42) :

$$\lambda = (1+4\pi\epsilon K_0)(1+4\pi f_0) \quad , \quad (45)$$

où le premier facteur est le pouvoir inducteur spécifique de l'éther, et le deuxième facteur la perméabilité magnétique de l'éther. Selon Duhem les expériences de Sarrazin et De La Rive ont permis d'établir que :

$$V_{T_0} = V_{CL} \quad (46)$$

où  $V_{T_0}$  est la vitesse des flux de déplacement transversaux dans l'éther. Des expressions (40), (41) et (46) ressort la "signification théorique" du paramètre  $\theta$  :

$$\theta = \sqrt{\frac{4\pi\epsilon K_0}{1 + 4\pi\epsilon K_0}} \quad (47)$$

Les expériences de Hertz ont permis, finalement, de confirmer la "première loi" de Maxwell :

$$V_{T_0} = V \quad (48)$$

L'égalité (47) est compatible avec la théorie de Helmholtz moyennant la modification introduite par Duhem dans cette théorie. Il rejette toujours, dans l'article de 1895, "l'hypothèse de Faraday - Mossotti".<sup>107</sup>

Un autre résultat d'importance auquel arrive Duhem dans cet article, concerne l'égalité entre les vitesses de propagation des ondu-  
lations longitudinale et transversale dans l'éther. Cette conséquence dépend des valeurs qu'il attribue à  $\lambda$  et à  $\theta$ . On peut effective-  
ment démontrer, à partir des équations (39) et (44), que :

$$V_{L_0} = \sqrt{\frac{\epsilon}{C^2/2} \cdot \frac{1}{(1 + 4\pi f_0)(4\pi\epsilon K_0)}}$$

Des équations (42), (43), (46), (38) et (48) résulte finalement que :

$$V_{L_0} = V_{T_0} \quad (49)$$

Dans un milieu diélectrique et magnétique quelconque, la théo-  
rie ne prévoit pas cette égalité, mais plutôt la suivante :

$$\frac{V_L}{V_T} = \sqrt{\frac{1 + 4\pi f}{1 + 4\pi f_0} \cdot \frac{1 + 4\pi\epsilon K}{1 + 4\pi\epsilon K_0}}, \quad (50)$$

un résultat dont Duhem croit qu'il peut "se prêter au contrôle de l'ex-  
périence".<sup>107</sup>

L'importance de l'article de 1895 se rapporte donc à la détermination des paramètres  $\lambda$  et  $\theta$  à partir des données expérimentales disponibles. Duhem rend ainsi plus crédible la modification qu'il avait apportée à la théorie de Helmholtz. Il donne aussi un fondement à son refus de faire  $\lambda = 0$  de façon à éliminer l'onde longitudinale. Cette dernière condition avait été imposée par Helmholtz lui-même à sa théorie. Nous avons vu que Poincaré, par contre, affirme que cette condition n'est pas nécessaire.

Les Tentatives d'obtenir une Théorie Electromagnétique  
de la Lumière

En 1896 Duhem publie le mémoire "Sur la propagation des actions électrodynamiques", qui donne suite à son projet de développer la théorie de Helmholtz. Le but de ce travail est selon lui (...)

"... de relier entre elles, d'une manière entièrement logique les découvertes les plus récentes faites dans le domaine de l'Electrodynamique, en particulier par Maxwell et par Helmholtz. Ce sont les idées fondamentales de ce dernier physicien que nous suivrons, à l'exclusion des doctrines nouvelles introduites depuis quelques années dans l'étude de l'électricité".<sup>108</sup>

Duhem essayera dans ce mémoire d'arriver à une théorie électromagnétique de la lumière à partir de la théorie de Helmholtz. C'est la première fois qu'il touche, dans un travail scientifique, à cette théorie, proposée initialement par Maxwell dans son mémoire de 1862.

Duhem met en évidence d'abord, les "difficultés insurmontables" auxquelles se heurtaient les théories éther-élastiques de la lumière dans l'explication des phénomènes de la réflexion et de la réfraction

de la lumière, dans le cas où les vibrations transversales sont dans le plan d'incidence. La théorie prévoit, dans ce cas, un résultat incompatible avec les hypothèses admises à savoir, que les vibrations réfléchies et/ou réfractées ne sont plus uniquement transversales, mais aussi longitudinales. "Ce désaccord suffit — affirme Duhem — en bonne logique, pour faire rejeter l'assimilation de la lumière aux vibrations transversales d'un solide élastique". 109

Duhem rejette ensuite les tentatives dues à Potier, Hertz, Cohn et Volkmann, d'application de la théorie électromagnétique de la lumière à ce problème. Ces tentatives ne sont pas acceptables, soutient-il, parce qu'elles s'appuient "sur des propositions douteuses et sujettes à litige de Maxwell, ou de ses continuateurs, tel que M. Poynting"<sup>110</sup>. Ces "propositions douteuses" portent sur les conditions aux limites des deux milieux posées par ces savants.

Duhem se propose d'aborder la question à partir de la théorie de Helmholtz, en introduisant des nouvelles conditions aux limites. Ses résultats sont entièrement négatifs en ce qui concerne la possibilité d'une théorie électromagnétique de la lumière :

"D'après ces nouvelles conditions limites, lorsqu'une onde électromagnétique plane, propageant une force électromotrice transversale et perpendiculaire au plan d'incidence, tombe sur la surface plane qui sépare deux milieux diélectriques, il y a une seule onde plane réfléchie et une seule onde plane réfractée; chacune d'elles propage une force électromotrice transversale et perpendiculaire au plan d'incidence; les formules qui lient la force réfléchie et la force réfractée à la force incidente sont identiques aux formules qui, selon Fresnel, lient la vibration réfléchie et la vibration réfractée à la vibration incidente, quand la lumière incidente est polarisée dans le plan d'incidence. Mais, lorsque l'onde incidente propage une force électromotrice transversale située dans le plan d'incidence, il n'est plus possible d'accorder les conditions aux limites par nous obtenues avec l'existence d'une seule onde réfléchie et d'une seule onde réfractée, propageant toutes deux une force électromotrice transversale..."

La conclusion que tire Duhem de cette difficulté étonne par sa

fermée :

"La théorie électromagnétique de la lumière se heurte donc à des contradictions tout à fait analogues à celles que rencontre la théorie élastique; l'une comme l'autre est logiquement inacceptable, l'une comme l'autre doit être reléguée au nombre de ces hypothèses chimériques qui ont sollicité les efforts des chercheurs et grandement contribué au progrès de la Physique, mais que la Physique rejette lorsqu'elle a cessé de s'en servir".<sup>110</sup>

Nous voyons qu'il ne peut pas y avoir de doutes sur l'interprétation de ce passage: Duhem réaffirme cette conclusion à la fin de son article.<sup>111</sup> Dans un article sur "les théories de l'Optique", publié deux ans auparavant, il ne semblait pas non plus très enclin à accepter la théorie électromagnétique de la lumière.<sup>112</sup>

Le ton arrêté de Duhem dans la conclusion de l'article de 1896 est d'autant plus surprenant que l'hypothèse d'une nature électromagnétique de la lumière était, alors, admise par la plupart des scientifiques.<sup>113</sup> Ce n'est pas tout. Lorentz dès 1875 avait réussi à obtenir une théorie électromagnétique de la lumière à partir de l'électrodynamique de Helmholtz.<sup>114</sup> Ce savant arrive dans ce travail à expliquer non seulement la réflexion et la réfraction de la lumière dans des milieux isotropiques, mais aussi l'optique des milieux cristallins, la double réfraction, la réflexion totale et la réflexion métallique. Ce travail était largement connu<sup>115</sup>, et certainement aussi par Duhem, puisqu'il le citera dans l'article de 1901 que nous analyserons plus bas. Lorentz en fait ne s'est "converti" à l'approche de Maxwell en électromagnétisme qu'à partir du début des années 90.

Nous pouvons essayer de spéculer sur les raisons pour lesquelles Duhem a pu rejeter les recherches de Lorentz de 1875.

D'abord Lorentz a fait appel à l'hypothèse de Faraday-Mossotti pour éliminer les ondes longitudinales prévues par la théorie de Helmholtz.<sup>116</sup> Or, nous avons vu que Duhem non seulement a abandonné cette hypothèse, comme il a retenu la prévision d'ondes longitudinales en faisant  $\lambda \neq 0$  dans cette théorie. Duhem, dans l'article de 1896, continue

à soutenir l'introduction du paramètre  $\Theta$  pour éviter l'hypothèse de Faraday-Mossotti.

Même si l'approche de Lorentz dans sa thèse de 1875 est encore fondamentalement macroscopique, il a introduit dans l'étude du rapport entre l'indice de réfraction et la capacité inductive des gaz certaines hypothèses concernant les interactions entre l'éther et la matière, que Duhem a dû rejeter comme relevant de la métaphysique.<sup>117</sup> Les travaux ultérieurs de Lorentz en Optique et en Electromagnetisme adoptent une perspective franchement microscopique, inadmissible pour Duhem.

Evidemment cela ne suffit pas à expliquer la fermeté de Duhem dans le passage cité plus haut. En fait la théorie proposée par Lorentz en 1875 était dans la droite ligne de ce que prône Duhem dans l'article de 1896. De toute façon, nous verrons que Duhem va revoir la conclusion principale de cet article par la suite.

Avant de poursuivre nous voudrions signaler le fait que dans l'article de 1896 Duhem critique à plusieurs reprises les théories de Maxwell. Il n'accepte pas, en particulier, l'hypothèse de Maxwell selon laquelle le flux total (comprennant les flux de conduction et de déplacement) est toujours uniforme<sup>118</sup>, un résultat qui dérive de la théorie de Helmholtz si l'on pose  $\lambda = 0$ .

L'article "Sur la théorie électrodynamique de Helmholtz et la théorie électromagnétique de la lumière" publié en 1901, représente un tournant dans le travail théorique de Duhem. S'il y a continuité au niveau du projet global de perfectionnement de la théorie de Helmholtz, il n'en reste pas moins le fait que Duhem revient sur certaines thèses soutenues dans ses mémoires antérieurs, qu'il abandonne certaines des modifications qu'il y avait proposées.

D'abord, comme le suggère le titre même de l'article, Duhem revoit la conclusion de son mémoire de 1896, concernant l'impossibilité

d'arriver à une théorie électromagnétique de la lumière logiquement acceptable. Il montre dans cet article que la théorie de Helmholtz peut effectivement aboutir à une théorie de la lumière. Pour y arriver Duhem est, toutefois, obligé de rénoncer à presque tout ce qui faisait l'originalité de sa démarche depuis 1894.

Duhem suppose maintenant que les courants de conduction et de déplacement admettent la même expression du potentiel électrodynamique. Il ne sera donc plus question du paramètre  $\theta$ , introduit dans son<sup>119</sup> article de 1894. Cependant, Duhem ne fait état nulle part du changement que cela représente par rapport à ses travaux précédents.

Pour faire concorder maintenant la théorie de Helmholtz avec les "lois" de Maxwell, il sera obligé d'adopter l'hypothèse de Faraday-Mossotti, qu'il avait rejetée auparavant.<sup>120</sup>

Nous croyons que cette remise en cause des principales thèses de l'article de 1894 tient au fait que Duhem admet, finalement, la théorie électromagnétique de la lumière. Symptomatique à cet égard est son adhésion à la "deuxième loi de Maxwell" qui, auparavant, ne lui semblait pas suffisamment confirmée par l'expérience.<sup>121</sup>

Il a pu aussi jouer dans l'abandon du paramètre  $\theta$  les considérations de la "note additionnelle" que se trouve à la fin du mémoire de 1896. Duhem y faisait état d'un certain nombre d'expériences qui ont établi que "la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans un diélectrique est en raison inverse de la racine carrée du pouvoir inducteur spécifique du diélectrique". Pour accorder la théorie de Helmholtz-Duhem avec ce résultat, il suggère de faire  $\theta$  une fonction de la polarisation et de l'état du milieu dans chaque point. Il remarque, toutefois, que l'adoption de cette nouvelle hypothèse rendrait impossible, dit-il, de "traiter simplement le problème de la réflexion et de la réflexion des ondes planes à la surface de séparation de deux diélectriques!"<sup>121</sup>

Duhem va admettre donc dans l'article de 1901, la condition  $\epsilon F \rightarrow \infty$ , que Helmholtz avait imposée à sa théorie en 1870 pour obtenir certains résultats de la théorie de Maxwell.<sup>122</sup> Duhem se refuse néanmoins à poser, comme Helmholtz,  $K=0$ , de façon à éliminer les

ondes longitudinales.<sup>123</sup> Duhem retient, en fait, les considérations de son article de 1895, où il était arrivé, à partir des expériences de Blondlot, à l'expression pour  $K$  :

$$K = (1 + 4\pi\epsilon F_0)(1 + 4\pi f_0) ,$$

avec  $F_0$  désignant ici la même grandeur que  $K_0$  dans l'article de 1895 (à savoir, le coefficient de polarisation diélectrique de l'éther); et  $f_0$  désignant toujours le coefficient d'aimantation de l'éther.<sup>124</sup>

Duhem continue, en conséquence, à affirmer en 1901 que "dans tous les diélectriques, la vitesse de propagation des flux longitudinaux est égale à la vitesse de la lumière dans le vide".<sup>125</sup>

Le principal résultat de cet article est bien, affirme-t-il, "que moyennant l'hypothèse de Faraday et de Mossotti, les lois trouvées s'accordent avec les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière à la surface de contact de deux milieux transparents, et cela bien qu'en notre système (...) les flux électriques longitudinaux ne soient pas exclus".<sup>126</sup>

Il reste donc une différence essentielle entre la théorie développée par Duhem et celle de Helmholtz, à savoir le rejet de la condition  $K=0$ , adoptée par ce dernier. Par ailleurs, il est curieux l'attachement de Duhem à ce qui est une conséquence, qu'il considère testable, de la théorie de Helmholtz à savoir, la propagation d'ondes longitudinales dans les diélectriques. Ainsi dans une note publiée en 1902, Duhem suggère une base expérimentale pour cette hypothèse.<sup>127</sup> En soulignant ses tentatives antérieures de détermination du coefficient  $K$ , il affirme :

"Dans notre enseignement, nous avons, à plusieurs reprises, fait remarquer l'analogie qui semble exister entre les oscillations électriques longitudinales régies par ces lois et les rayons X. Sans nous faire illusion sur le caractère conjectural de cette analogie, nous avons cru intéressant de la rappeler au moment de la publication des belles expériences de N. Blondlot".

Duhem soutiendra encore cette même "analogie" dans sa Notice de 1913.<sup>128</sup>

Duhem s'attachera obstinément, jusqu'aux derniers de ses écrits, au programme défini en 1894: fonder l'électromagnétisme sur la théorie de Helmholtz de 1870. Dans un article publié en 1916 dans les Comptes-Rendus, il discute encore les conséquences de l'introduction de l'hypothèse de Faraday-Mossotti dans la théorie de Helmholtz, dans le but d'expliquer le phénomène de "résonance électrique".<sup>129</sup> Dans cet article il soutient que la théorie de Helmholtz est préférable à celle de Maxwell, étant donné le fait que la première prévoit un "champ électrodynamique longitudinal", mais pas la deuxième :

"Si l'on admet l'hypothèse de Faraday et de Mossotti, le champ électrique total, au sein d'un corps purement diélectrique, est sensiblement transversal; le champ électrostatique est, en chaque point, sensiblement compensé par la composante longitudinale du champ électrodynamique (...). Si donc on admet l'hypothèse en question, et si l'on se propose seulement d'étudier le champ électrique total, on fera une approximation légitime en admettant que ce champ est rigoureusement transversal; ce champ sera, dès lors, régi par les équations de Maxwell. Mais de l'étude ainsi simplifiée on n'aura le droit de rien conclure touchant le champ électrostatique et le champ électrodynamique".<sup>130</sup>

SECTION VI.8- L'OUVRAGE LES THEORIES ELECTRIQUES DE  
J. C. MAXWELL

La publication de l'ouvrage Les Théories Electriques de Maxwell au début du X<sup>X</sup><sup>ème</sup> siècle constitue un fait historique qui demande une explication. 30 ans après la publication du Treatise de Maxwell, un physicien de la taille de Duhem entreprend l'analyse de l'oeuvre de ce savant avec une minutie dont l'anachronisme étonne.

Nous sommes d'autant plus portés à considérer cette publication comme une anomalie que, pendant ces trente années, il y a eu des développements très importants, aussi bien dans la théorie des phénomènes électromagnétiques que dans la théorie électromagnétique de la lumière.

Il suffit de faire référence au développement de la théorie des électrons par Lorentz et Poincaré. Dans ses conséquences ultimes et radicales, cette théorie a produit une "vision électromagnétique de la nature" avec Abraham et d'autres, dans le contexte d'une problématique qui ne sera résolue qu'avec la théorie de la relativité restreinte d'Einstein (1905).

Nous croyons pouvoir affirmer que l'ouvrage de Duhem de 1902 est anachronique par rapport à un "temps scientifique". Sa problématique, dans une perspective strictement scientifique, était dépassée. Cette anomalie demande une explication à l'historien des sciences.

La signification de cet ouvrage n'apparaît qu'en faisant appel à la logique interne du "programme" scientifique Duhemien, et aussi aux conceptions épistémologiques et historiographiques de ce savant.

Dans sa Notice sur les Titres et Travaux Scientifiques de 1913 Duhem souligne la complémentarité de ses réalisations dans le domaine de l'électrodynamique: les contributions qu'il a apportées à la

"doctrine électrodynamique" de Helmholtz et sa critique des théories de Maxwell (notamment dans l'ouvrage de 1902). Ces deux tâches théoriques avaient comme but, dit-il, d'asseoir la suprématie de la théorie de Helmholtz par rapport aux théories de Maxwell. La première tâche fut de montrer que la théorie de Helmholtz est en mesure de rendre compte des données expérimentales. Cette théorie aurait, en plus, une nette supériorité logique, vis à vis des théories du savant écossais.

Selon la Notice, l'ouvrage de 1902 prétend asseoir la thèse selon laquelle les théories de Maxwell doivent être rejetées sur la base d'exigences logiques. Elle s'insère dans un projet théorique global:

"Le concours que nous nous proposons de donner à la doctrine de Helmholtz n'eût donc pas été complet s'il eût été privé d'une analyse critique des théories électriques de J. Clerk Maxwell".<sup>131</sup>

Nous essayerons de voir dans quelle mesure il a accompli cette deuxième tâche, et surtout, de quelle façon.

Duhem affirme, effectivement, son but "critique" dans l'ouvrage Les Théories Electriques de Maxwell. Il s'agira, dit-il, "d'achever" l'oeuvre de Maxwell, de transformer ses suggestions en "vérités démontrées" de façon "à distinguer nettement, d'une part, les propositions susceptibles d'être logiquement démontrées et, d'autre part, les affirmations qui heurtent la logique et qui doivent être transformées ou rejetées".<sup>132</sup> Cette tâche est celle d'un "physicien". L'objectif du physicien doit être celui de chercher — affirme Duhem — une "théorie physique unique qui, du plus petit nombre possible d'hypothèses compatibles entre elles, tirerait, par des raisonnements impeccables, l'ensemble des lois expérimentales connues".<sup>133</sup> Ce programme ne pourra jamais s'accomplir — continue Duhem — avec le foisonnement de théories "sans lien les unes avec les autres", voire contradictoires entre elles. La tâche du physicien est, selon lui, celle de "s'efforcer de substituer l'unité au disparate", ou "l'accord logique à la contradiction", et surtout jamais — comme il reproche à Poincaré — d'en prendre le parti.

Cet ouvrage ne se présente donc pas comme un travail d'his -

torien des sciences. Ce qui ne veut pas dire, pour autant, qu'un certain type d'approche historique n'y joue pas un rôle qui se rapporte au but critique.

Duhem aurait pu, par exemple, prendre le Treatise de Maxwell — qui est la forme la plus achevée de ses théories en électricité et magnétisme — et y exercer une critique. D'autres physiciens l'ont fait, comme par exemple Poincaré et Hertz. Duhem, lui-même, a fait une tentative de ce genre dans son article de 1894.

La démarche de Duhem est ici toute autre. Il considère non seulement le Treatise, mais également les mémoires antérieurs de Maxwell. C'est comme si maintenant la tâche critique ne pouvait s'accomplir que sur le développement d'une théorie, c'est-à-dire sur les divers stades du travail de construction théorique.

La critique Duhemienne s'exercera, effectivement, non pas sur une théorie achevée prise de façon statique, mais sur la dynamique du travail théorique: la création et les changements conceptuels effectués sur fond de "l'évidence" empirique disponible. La critique se fait dans une perspective historique, et c'est la grande originalité de cette entreprise par rapport à d'autres qui avaient un but analogue.

Mais la conception de l'histoire des sciences qui est sous-jacente à l'ouvrage de Duhem est bien éloignée de celle qu'on pourrait attendre d'un historien. Dans la présentation des multiples théories formulées par Maxwell de 1855 à 1873, Duhem déploie une grille conceptuelle qui "fausse" cette trajectoire théorique. Cela transparaît immédiatement à travers une simple analyse de la Table de Matières.

La première partie a comme titre général "Les électrostatiques de Maxwell" (le pluriel est à remarquer) et la deuxième partie "L'électrodynamique de Maxwell".

Si cette division des sujets traités par Maxwell est fidèle à celle qu'on trouve dans le Treatise, elle est cependant inadéquate pour rendre compte de ses mémoires antérieures, de la relation entre les théories qui y sont développées. Cette division ne correspond pas à la structure singulière de chaque mémoire et ne permet pas de mettre en évidence la logique du changement conceptuel chez Maxwell.

Nous pouvons donc soupçonner la structure de l'ouvrage de Duhem d'être viciée déjà par une illusion rétrospective. Un trait qui, par ailleurs, n'enlève pas de valeur à l'approche d'un physicien, ou même d'un philosophe, mais qui risque de nuire au travail d'un historien.

Essayons de présenter, dans ses traits généraux, les subdivisions de l'ouvrage.

Dans la première partie, Duhem développe sa thèse sur l'existence de trois électrostatiques différentes et à certains égards incompatibles, dans l'oeuvre de Maxwell.

Il applique ensuite cette grille conceptuelle à l'étude de l'hypothèse de l'uniformité du courant total.

La dernière partie de l'ouvrage concerne l'électromagnétisme. Duhem étudie notamment les notions d'énergie électromagnétique et d'état électrotonique dans les écrits de Maxwell.

Le dernier chapitre de l'ouvrage aborde la théorie électromagnétique de la lumière, les formulations de cette théorie chez Maxwell et leurs traits singuliers par rapport à des tentatives théoriques analogues.

Notre principal objectif en analysant l'ouvrage Les Théories électriques de Maxwell est celui de caractériser un modèle de critique chez Duhem. Il ne s'agira pas de considérer toutes les difficultés que Duhem soulève, mais plutôt les types de difficultés, à partir de quelques parties de l'ouvrage analysées en détail.

### Les Electrostatiques de Maxwell

Nous avons déjà mis en évidence un des traits caractéristiques de l'analyse Duhemienne des théories de Maxwell: elle est toujours biaisée par la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti, en ce qui concerne l'électrostatique et par la théorie de Helmholtz en ce qui con-

cerne l'électrodynamique.

Dans l'ouvrage Les Théories Electriques de J.C. Maxwell, Duhem va justifier cette approche de l'électrostatique de Maxwell en considérant l'ensemble de l'oeuvre de ce savant en électricité et magnétisme.

Nous avons vu que dans l'article de 1894, sa critique de la théorie de Maxwell était liée à la possibilité d'interpréter cette théorie à partir des concepts de la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti. Duhem va justement montrer, dans son ouvrage de 1902, que cette interprétation ne peut pas être faite systématiquement et d'une façon consistante, si l'on rentre dans les détails des théories proposées par Maxwell de 1855 à 1873. Duhem ne va cependant pas abandonner la perspective de la théorie classique des diélectriques. Au contraire, cette théorie va maintenant être employée comme un outil visant détecter les changements conceptuels qui ont lieu tout au long de l'oeuvre de Maxwell. La critique Duhemienne du caractère contradictoire de la théorie de Maxwell ne sera plus dirigée - comme dans l'article de 1894 - contre un écrit particulier, mais contre l'ensemble de l'oeuvre du savant écossais.

L'électrostatique des premiers mémoires de Maxwell n'est pas "nouvelle", selon Duhem. Les grandeurs qui y apparaissent peuvent recevoir une traduction immédiate en terme de grandeurs de l'électrostatique "ancienne". Les différences qu'il va signaler entre l'électrostatique "ancienne" et celle de Maxwell auraient comme origine soient, des "fautes de signe" commises par ce savant soient, des stratagèmes ayant comme but d'éviter des contradictions trop flagrantes soit, l'introduction de nouvelles hypothèses dans la théorie.

Duhem soutiendra à partir de cette grille la thèse de l'existence de trois électrostatiques différentes dans l'oeuvre de Maxwell.

L'ancienne électrostatique, à laquelle fait référence Duhem, est caractérisée par:

a) l'action à distance entre charges électriques;

b) la théorie du potentiel électrostatique et de la distribution électrique dans les corps conducteurs;

c) la théorie de Mossotti des diélectriques, avec les grandeurs qui lui sont associées de charge réelle (sur les corps conducteurs) et de charge fictive (équivalente à la polarisation des diélectriques).

Pour juger si "les électrostatiques" proposées par Maxwell sont équivalentes ou pas à cette électrostatique "ancienne", il faut comparer, selon Duhem, les grandeurs qui y sont définies et les hypothèses admises.

La "première électrostatique" de Maxwell, que Duhem considère être développée dans le mémoire FA, n'aurait aucune nouveauté par rapport à l'électrostatique ancienne, en ce qui concerne les grandeurs qui y sont utilisées:

"... en usant les mots charge électrique, fonction potentielle, polarité, [Maxwell], entend les employer dans le sens accepté de tous (...)"<sup>134</sup>

En particulier, l'analogie développée par Maxwell dans le mémoire FA n'est, pour Duhem, qu'une "illustration" de l'électrostatique ancienne, de la théorie des diélectriques de Mossotti:

"[Maxwell] a simplement prétendu donner une théorie des diélectriques, différente au point de vue des hypothèses physiques, mais identique au point de vue des équations mathématiques à la théorie que domine l'hypothèse des molécules polarisées."<sup>135</sup>

Duhem semble reconnaître dans cette "première électrostatique" une nouveauté: l'hypothèse selon laquelle le "champ" serait le siège de l'énergie électrostatique. Seule cette hypothèse, ajoutée à l'ensemble de règles qui établissent l'analogie peut engendrer, selon lui, une "électrostatique nouvelle":

"Ces diverses règles, si elles existaient seules, pourraient être regardées comme un simple jeu de formules, comme des conventions purement arbitraires; elles perdent ce caractère, pour prendre celui d'une électrostatique, d'une théorie physique, susceptible d'être confirmée ou contredite par l'expérience lorsqu'on y joint l'hypothèse suivante: le système est le siège d'actions qui admettent pour potentiel la quantité

$$U = \frac{1}{2} \int \Psi_e d\omega ,$$

l'intégrale s'étendant au système tout entier." <sup>136</sup>

Cette "nouvelle hypothèse" réalise, pour Duhem, le passage d'une théorie d'action à distance à une théorie d'action contigüe.

Toutefois, l'équation ci-dessus n'est pas donnée dans le mémoire FA.<sup>137</sup> S'il y a, clairement, une recherche d'un "autre point de vue" dans l'approche des phénomènes<sup>138</sup> - caractérisé par l'adoption du concept de "ligne de force" - il serait erroné d'y voir, pour autant, développée une théorie fondée sur l'hypothèse d'une action transmise de proche en proche. La "méthode d'analogie physique" est un instrument pour obtenir des "idées mathématiques", permet d'avancer la recherche théorique, mais n'aboutit pas à ce que Maxwell appelle une "théorie physique". Il a également été explicite, dans ce mémoire, au sujet de son intention d'éviter toute "hypothèse physique".

L'hypothèse sur le siège de l'énergie ne jouera, toutefois, pas un rôle important dans les analyses sur l'électrostatique de Maxwell chez Duhem. Le fil conducteur sera constitué par la comparaison entre les grandeurs utilisées par Maxwell et celles de "l'ancienne électrostatique".

La Grandeur "Déplacement Electrique" dans les

Mémoires de Maxwell

Nous examinerons d'abord le contexte dans lequel cette grandeur est définie chez Maxwell.

Le "déplacement électrique" est introduit à partir de la troisième partie du mémoire PH: "The Theory of Molecular Vortices applied to Statical Electricity". Il y a un consensus dans l'historiographie contemporaine sur Maxwell, concernant la rupture qui introduit, à l'intérieur de ce mémoire, sa troisième partie. On y trouve une première ébauche de ce qui deviendra la théorie électromagnétique de la lumière.

Plusieurs indications laissent penser que Maxwell ne s'attendait pas au départ à ce résultat, et que la troisième partie du mémoire PH a été pensée et écrite après les deux premières parties.

Pour parvenir aux résultats révolutionnaires qui annoncent une nouvelle théorie de la lumière, Maxwell a dû introduire de nouvelles hypothèses dans la théorie des vortices moléculaires qu'il avait élaborée dans les deux premières parties du mémoire. Dans la première forme de cette théorie, les vortices sont des tourbillons d'une certaine "substance" ou "matière". Le milieu constitué par ces vortices se comporte comme un fluide incompressible et possède des contraintes internes spéciales qui le différentient d'un fluide ordinaire. Séparant les vortices, il existe une couche de particules qui jouent le rôle "d'électricité".

Ces particules avaient été introduites de façon à "articuler les vortices entre eux". Les forces entre particules et vortices sont supposées uniquement tangentielles; Maxwell montre alors comment elles peuvent représenter les forces électromotrices. Cette action uniquement tangentielle est assurée par un contact de roulement non glissant.

Un élément de volume du milieu fluide peut changer de forme et de position, en conséquence par exemple du mouvement de corps dans le milieu. Ces changements de forme d'un élément de volume provoquent des modifications dans la vitesse de rotation des vortices situés dans son intérieur. Tout le développement mathématique à ce sujet concerne toujours un élément de volume du milieu et non pas les vortices pris individuellement.

Dans la troisième partie du mémoire Maxwell aborde l'électros-

tatique, et il y est supposé que la force magnétique est nulle dans le "champ". Il n'y a donc plus de mouvement tourbillonnaire. Au lieu de vortices, les éléments du milieu sont des cellules douées de la propriété d'élasticité. Les forces entre particules et cellules pourront être aussi bien tangentiellles que normales. Ces forces produisent des déformations dans la cellule qui, en conséquence de son élasticité, exerce sur la couche de particules une force contraire de même magnitude. Cette élasticité de la substance des cellules sera supposée du même type que l'élasticité des corps solides. Ce qui rend plausible l'introduction de cette nouvelle hypothèse est l'analogie que Maxwell développe (et qui devient une identité à la fin de son mémoire) entre le milieu électromagnétique et l'éther luminifère.

Maxwell va suggérer une analogie entre un conducteur et une "membrane poreuse" qui offre résistance au passage d'un fluide. Le diélectrique ressemblera, par contre, à une "membrane élastique" imperméable qui peut transmettre la "pression" du fluide.

C'est dans ce contexte que Maxwell introduit l'idée centrale d'un déplacement électrique ayant lieu dans les diélectriques, idée associée à celle de la polarisation, qu'il emprunte à Mossotti:

"Electromotive force acting on a dielectric produces a state of polarization of its parts similar in distribution to the polarity of the particles of iron under the influence of a magnet, and, like the magnetic polarization, capable of being discribed as a state in which every particle has its poles in opposite conditions.

In a dielectric under induction, we may conceive that the electricity in each molecule is so displaced that one side is rendered positively, and the other negatively electrical, but that the electricity remains entirely connected with the molecule, and does not pass from one molecule to another"<sup>139</sup>

Appuyant sur cette caractérisation du "déplacement électrique" (qui est d'ailleurs réaffirmée dans toute l'oeuvre de Maxwell), Duhem va

interpréter cette grandeur dans la perspective de la théorie "classique" des diélectriques :

"Dans cette représentation de la polarisation diélectrique, le DEPLACEMENT de la substance élastique nommée ELECTRICITE va jouer exactement le même rôle que le DEPLACEMENT DU FLUIDE ETHERE dont parlait Mossotti; il MESURERA, en chaque point, l'INTENSITE DE POLARISATION".<sup>140</sup>

Duhem introduit cette thèse dans le contexte du mémoire PH , mais il l'étend au mémoire DT. Nous verrons les conséquences qu'il va tirer de cette extension. Mais Duhem va plus loin et suggère même une continuité, à ce niveau, entre la 1<sup>ère</sup> électrostatique (du mémoire FA ) et la 2<sup>ème</sup> électrostatique (des mémoires PH et DT) de Maxwell.<sup>141</sup>

En ce qui concerne la définition de la grandeur "déplacement électrique", il n'y aurait donc pas de "nouveau" chez Maxwell par rapport aux "hypothèses traditionnelles" de la théorie des diélectriques. Duhem en tire des conséquences sur la caractérisation du statut de la grandeur "électricité libre" chez Maxwell.

#### La Grandeur "Electricité Libre" dans les Mémoires de Maxwell

L'interprétation que suggère Duhem de la grandeur "déplacement électrique" aurait des conséquences sur le statut de la grandeur "électricité libre" dans les mémoires PH et DT de ce savant :

"... comme le déplacement (f, g, h) est certainement, pour Maxwell, l'exact équivalent de l'intensité de polarisation entre les composantes du déplacement et la quantité  $e$  il n'hésite pas à écrire la relation que Poisson avait établie entre les composantes de l'aimantation et la densité magnétique fictive, et que Mossotti avait étendue aux diélectriques...".<sup>142</sup>

Cette constatation, que nous analyserons par la suite, autorise Duhem à définir la grandeur "électricité libre" de la même façon que la grandeur "densité solide de la distribution électrique fictive" dans la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti.

Dans le passage que nous venons de citer Duhem fait référence à l'équation (G) du mémoire DT:

$$e + \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0 \quad (1)$$

Son interprétation semble correspondre à la pensée de Maxwell qui, dans le commentaire de cette équation, affirme effectivement que l'électricité libre est l'effet d'une "électrisation des différentes parties du champ qui ne se neutralisent pas mutuellement".<sup>143</sup>

Duhem essayera d'étendre le champ de cette interprétation au mémoire PH. Le problème est que l'équation (1) n'y apparaît pas. Il tentera, néanmoins, de montrer que la grandeur  $e$  peut être interprétée de la même façon. Le point de départ de son raisonnement est l'équation :

$$e = \frac{1}{4\pi E^2} \left( \frac{dP}{dx} + \frac{dQ}{dy} + \frac{dR}{dz} \right) \quad , \quad (2)$$

écrite dans la Prop. XIV du mémoire PH. (P, Q, R) sont les composantes de la force électromotrice; E une constante que Maxwell montrera, dans cette partie de son mémoire, être égale au rapport des unités électrostatique et électrodynamique de charge.

Cette interprétation électrique de la constante E a une place centrale dans la première formulation de la théorie électromagnétique de la lumière. Cette constante avait, auparavant, reçu une interprétation à partir des propriétés mécaniques du milieu électromagnétique. Cette double interprétation de la constante E va permettre à Maxwell de formuler le célèbre résultat selon lequel les ondes qui se propagent dans le milieu électromagnétique ont la même vitesse que la lumière.<sup>144</sup>

Duhem n'est pas concerné par le contexte dans lequel se place cette équation, mais uniquement par ses propriétés formelles. L'équation (2), Maxwell l'obtient par intégration. Il néglige la constante d'intégration parce que, dit-il, "...  $e=0$  quand il n'y a pas de forces électromotrices".<sup>145</sup> Cette proposition est pour Duhem la preuve indénia-

ble que la grandeur  $\underline{e}$  peut être interprétée, dans le mémoire PH, comme une densité de charge fictive.

Cette conclusion, toutefois, ne s'impose pas. Un examen des Propositions XIV et XV du mémoire PH laisse penser que Maxwell attribue à cette grandeur la signification de charge réelle. Il s'agit pour lui d'établir l'équation pour la force d'interaction Coulombienne:

$$F = -E^2 \frac{e_1 e_2}{r^2} \quad (3)$$

où  $e_1$  et  $e_2$  sont exprimées en unités électrodynamiques de charge. Ces charges avaient, effectivement, été liées au courant électrique (p, q, r) par l'équation:

$$\frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} + \frac{de}{dt} = 0 \quad (4)$$

L'équation (4) précède, logiquement, l'équation (1).

Dans ces deux propositions il n'y est nulle part question de polarisation diélectrique. La signification de la grandeur  $\underline{e}$  dépend donc, de celle qu'on attribue aux grandeurs (p, q, r) dans ce mémoire. Nous verrons que Duhem sera prêt à les interpréter comme les composantes du courant total. Cela va lui permettre d'établir une relation entre la grandeur  $\underline{e}$  et le courant de déplacement, ce qui est compatible avec sa thèse. Nous verrons, toutefois, que cette relation n'est pas forcée.<sup>146</sup> Nous reviendrons à ce sujet.

Ce que nous voulons mettre en évidence est que l'interprétation que suggère Duhem de la grandeur  $\underline{e}$  du mémoire PH est loin d'être évidente, et suppose une interprétation des autres grandeurs qui lui sont associées et du contexte dans lequel les développements de Maxwell ont lieu.

Duhem nous semble trop pressé d'établir une continuité entre les mémoires PH et DT et de caractériser, de cette façon, ce qu'il désigne comme la "deuxième électrostatique" de Maxwell. Ainsi il affirmait, plus loin, que dans cette "deuxième électrostatique", il n'y est jamais question de distributions de charge réelles:

"... en aucun cas Maxwell ne tient compte d'une électrisation non réductible à la polarisation des diélectriques, d'une électrisation propre des corps conducteurs".<sup>147</sup>

Nous identifions ici ce que Duhem considérait, dans son article de 1894, être "l'idée particulière de Maxwell". Il empruntait, à cette occasion, une interprétation due à Hertz.<sup>148</sup> Maintenant il désigne ce résultat comme la "théorie de la charge" chez Maxwell.

Nous verrons par la suite que l'interprétation que donne Duhem des grandeurs "déplacement électrique" et "électricité libre" va fonder sa thèse sur l'inconsistance de ce qu'il caractérise comme "la deuxième électrostatique" de Maxwell.

L'Equation entre la Force Electromotrice et le  
Déplacement Electrique chez Maxwell

Dans la troisième partie du mémoire PH, Maxwell pose une relation entre la force électromotrice et le déplacement électrique, qui jouera un rôle central dans la première formulation de la théorie électromagnétique de la lumière:

$$R = -4\pi E^2 h \quad , \quad (5)$$

où  $E$  reçoit la même définition que plus haut (éq. 2);  $h$  est la composante selon "z" du déplacement électrique;  $R$  est la composante selon "z" de la force électromotrice. Maxwell introduit l'équation (5) comme une relation phénoménologique, indépendante du mécanisme qu'il avait proposé pour les diélectriques;<sup>149</sup>

Le coefficient  $E$  prendra, par la suite, une signification mécanique, et sera associé aux propriétés élastiques du milieu électromagnétique.

Duhem conteste la validité de l'équation (5) à cause du signe négatif dont elle est affectée. Son argumentation évolue sur deux terrains différents.

Il dénonce d'abord une faute de signe commise par Maxwell dans une manipulation algébrique où cette équation est déduite à partir du mécanisme de vortices et particules. Cette faute est indéniable.<sup>150</sup> Mais puisque l'équation (5) précède ces développements, nous ne croyons pas qu'on puisse, comme le fait Duhem, s'appuyer sur cette faute pour contester sa validité. Maxwell l'introduit - nous insistons sur ce point - comme "indépendante d'une quelconque théorie sur le mécanisme interne des diélectriques".<sup>151</sup> Le signe négatif de l'équation (5) va s'avérer, en fait, nécessaire pour que l'équation (2) soit compatible avec la loi de Coulomb<sup>152</sup> et pour l'obtention du résultat central de ce mémoire: l'identification entre le milieu électromagnétique et l'éther luminifère. Cette équation ne pourrait donc pas avoir, dans ce contexte, un signe différent.

Mais la mise en question de la validité de l'équation (5) s'appuie sur un autre argument qui a, de toute évidence, plus de poids à ses yeux. Nous avons vu que, pour lui, la grandeur "déplacement électrique" a la même définition que la grandeur "intensité de polarisation". Or, si la polarisation des diélectriques est l'effet du déplacement d'un fluide positif - comme suppose la théorie de Massotti - ce déplacement doit nécessairement se faire dans le même sens de la force électromotrice. D'après cette interprétation l'équation (5) ne pourrait alors être affectée que d'un signe positif.

Une évidence aditionnelle pour Duhem de la faute qu'il associe à l'équation (5), est le fait que Maxwell change effectivement le signe de cette équation à partir du mémoire DT. Il écrira alors<sup>153</sup> :

$$R = + K h \quad (6)$$

où les grandeurs ont la même signification que dans l'équation (5) plus haut.<sup>154</sup>

Ce changement dans l'équation entre force électromotrice et déplacement électrique, changement qui a lieu entre les mémoires PH et DT est, pour Duhem, non seulement la preuve que Maxwell s'est trompé dans le premier, mais surtout - et c'est la question centrale - que la polarisation

est bien l'effet du déplacement d'un fluide positif, comme chez Mossotti:

"Pour Mossotti la force électromotrice rencontrant un des corpuscules dont se composent les corps diélectriques, chasse le fluide éthéré des parties de la surface où elle entre dans le corpuscule pour l'accumuler sur les régions par où elle sort."

Duhem est convaincu que cela correspond toujours à l'idée que Maxwell se fait du déplacement électrique jusqu'aux derniers de ses écrits:

"On n'en saurait douter, le déplacement reste bien, pour Maxwell, un entraînement de l'électricité positive que la force électromotrice produit dans sa propre direction, entraînement qui se limite à chaque petite portion du diélectrique...".<sup>155</sup>

Duhem cite des passages où Maxwell semble supposer le contraire (comme dans le mémoire PH), mais il tâche, à chaque fois, de montrer qu'il s'agit, soit d'une "faute de signe", soit d'un stratagème utilisé par Maxwell pour éviter une contradiction.<sup>156</sup>

Duhem, en s'arrêtant sur cette interprétation de la grandeur "déplacement électrique" chez Maxwell (et il cite de nombreux extraits où ce savant épouse effectivement ce point de vue) va soutenir que cette interprétation, en conjugaison avec l'équation (1) du mémoire DT, sera alors en contradiction avec la "théorie de la charge" chez le savant écossais.

#### La Contradiction de la "Deuxieme Electrostatique" de Maxwell

Duhem formule la "théorie de la charge" chez Maxwell de la façon suivante :

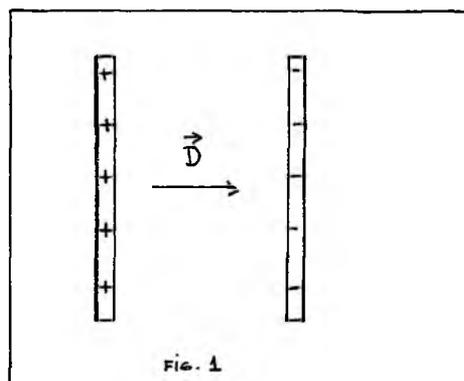
"... toute charge est l'effet résiduel de la polarisation du diélectrique".<sup>157</sup>

D'après cette théorie, les charges sur l'interface entre les milieux conducteurs et les milieux diélectriques seraient uniquement "fictives", c'est-à-dire, équivalentes à la polarisation de ces derniers milieux.<sup>158</sup>

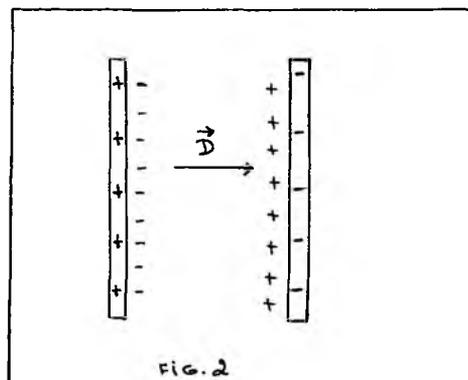
Si celle-ci est bien, comme le croit Duhem, le statut de la charge électrique chez Maxwell, alors elle est en contradiction, dans sa "deuxième électrostatique", avec les équations (1) et (6) qui y sont admises.

Pour le montrer, Duhem applique ces équations à un condensateur électrique. On va illustrer son raisonnement à travers les figures 1 et 2.

Soit un condensateur dont les plaques sont chargées comme l'indique la fig. (1). L'éq. (6) du mémoire DT, qui exprime le rapport entre la force électromotrice et le déplacement électrique, fournit pour celui-ci (représenté par le vecteur  $\vec{D}$ ) la direction indiquée dans cette figure. Le déplacement a lieu dans la même direction que la force électromotrice.<sup>159</sup>



Maintenant, l'équation (1) de l'électricité libre exprime le fait que le déplacement électrique, qui a lieu dans un diélectrique, produit une distribution "fictive" de charge dans ses surfaces de discontinuité (où les charges dues à la polarisation ne sont pas équilibrées, comme c'est le cas à l'intérieur du diélectrique). Cette équation exige qu'on introduise dans la figure ces distributions fictives. On aura alors la situation de la figure 2: du côté de la plaque chargée positivement, le diélectrique présente une charge superficielle négative; du côté de la plaque chargée



négativement, le diélectrique présente une charge superficielle positive. Il est important de remarquer, en passant, que cette distribution fictive de charge est compatible avec la supposition — que Duhem attribue à Maxwell — que la force électromotrice fait déplacer un fluide positif dans les éléments qui composent le diélectrique.

La situation illustrée dans la fig. 2, en accord avec les équations (1) et (6), est cependant incompatible avec la "théorie de la charge" de Maxwell puisqu'il "est impossible — affirme Duhem — d'identifier la charge électrique que porte un conducteur avec la charge prise par le diélectrique contigu".<sup>160</sup>

Celle-ci est la contradiction fondamentale que voit Duhem dans la "deuxième électrostatique" de Maxwell (c'est-à-dire celle du mémoire PH avec l'équation (5) "corrigée", et l'équation (1) du mémoire DT). Elle va lui permettre de démarquer la "deuxième" de la "troisième" électrostatique de Maxwell (celle du mémoire NO et du Treatise).

#### La "Troisième Electrostatique" de Maxwell

La "contradiction" mise en évidence par Duhem disparaît dans la nouvelle électrostatique qu'expose Maxwell dans le mémoire NO et dans le Treatise. Dans cette "troisième électrostatique" Maxwell admet l'éq. (6) entre la force électrostatique et le déplacement électrique.<sup>161</sup> Duhem soutient que Maxwell y épouse toujours la même "théorie de la charge". Il y a, cependant, un changement central du point de vue de l'analyse Duhemienne, concernant l'équation de l'électricité libre. Maxwell écrit maintenant à la place de l'éq. (1) :

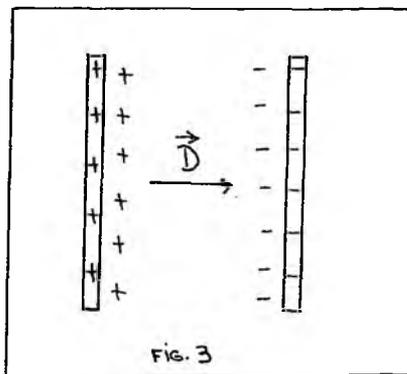
$$\rho = \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} \quad (7)$$

où  $\rho$  représente la même grandeur que  $\rho$  dans les mémoires précédents.<sup>162</sup>

Avec ce changement de signe disparaît la "contradiction" à laquelle se référait Duhem en rapport avec la "deuxième électrostatique".

La situation illustrée dans la fig. 2 (voir plus haut) n'est effectivement plus en accord avec cette nouvelle forme de l'équation pour l'électricité libre. On aura, plutôt, la distribution "fictive" montrée dans la fig. 3. On voit maintenant que la distribution de charge sur les conducteurs peut être attribuée à la polarisation qui a lieu dans le diélectrique, en accord avec la "théorie de la charge" de Maxwell.

Cependant, Duhem met en évidence l'impossibilité, dans cette troisième électrostatique, d'interpréter le déplacement en terme d'un déplacement d'une substance positive, contrairement aux idées "reçues" sur la polarisation des diélectriques: les idées admises par "Coulomb et Poisson dans l'étude du magnétisme, Faraday et Mossotti dans l'étude des diélectriques (...)" et l'opinion professée par Maxwell lui-même en ses premiers écrits ..."<sup>163</sup>



Mais ce changement de signe dans l'équation de l'électricité libre, avec les conséquences qu'il entraîne pour l'interprétation physique des grandeurs de la théorie de Maxwell, ne l'empêche pas — affirme Duhem — de continuer à formuler jusqu'à ses derniers écrits, l'hypothèse d'un déplacement d'électricité positive à l'intérieur des diélectriques, comme résultat de l'induction.

Duhem conclut, alors, avec une pointe d'ironie:

"Comment deux propositions aussi manifestement contradictoires pouvaient-elles se présenter au même instant à l'esprit de Maxwell et, toutes deux à la fois, entraîner son adhésion ? C'est un étrange problème de psychologie scientifique que nous livrons aux méditations du lecteur".<sup>164</sup>

Discussion des Analyses Précédentes

Hertz, en 1892, a avoué l'échec de sa tentative de donner au mot "électricité" comme il est utilisé dans le Treatise, une signification unique. Il serait, d'après lui, impossible d'éliminer certaines contradictions au sein de l'ouvrage de Maxwell, contradictions attachées, de toute évidence, à la signification physique de la grandeur "charge électrique". Hertz donne une explication historique de cet état de choses. Maxwell, selon lui, a adopté, dans les mémoires qui ont précédé le Treatise, des points de vue différents et même, contradictoires, en ce qui concerne le statut de la charge électrique et le mode de transmission de la force. Des résidus de cette trajectoire théorique auraient subsisté dans le Treatise, et seraient à l'origine des contradictions de cet ouvrage. Hertz n'offre, malheureusement, pas d'évidences historiques pour appuyer sa thèse. Son but est fondamentalement de justifier l'abandon de ce qu'il considère être l'échafaudage de la théorie de Maxwell.<sup>165</sup>

Nous sommes convaincus que le projet de l'ouvrage de 1902 de Duhem a comme origine ces considérations de Hertz : il faut suivre le travail théorique de Maxwell depuis son premier mémoire, et montrer l'origine des inconsistances du Treatise. L'originalité de l'ouvrage Les théories électriques de J. C. Maxwell se trouve là. Néanmoins, dix ans se sont écoulés entre l'analyse de Hertz et la publication de Duhem, ce qui montre la persistance, chez ce dernier savant, de cette problématique.

Nous voudrions discuter deux thèmes soulevés dans ce que nous avons rapporté jusqu'ici: d'abord le changement de signe, que Duhem fait ressortir pertinemment, dans l'équation (5) entre la force électromotrice et le déplacement électrique; ensuite, et en rapport avec ce thème, celui de la "contradiction" de la "deuxième électrostatique" de Maxwell.

Bromberg<sup>166</sup> fait une analyse brillante de l'ambiguïté implicite dans l'équation (5) du mémoire PH et de comment Maxwell en a tiré parti pour arriver au résultat de l'égalité entre la vitesse des

ondes électromagnétiques et la vitesse de la lumière. Nous tenons à résumer cette analyse qui donne un nouvel éclairage à la thèse de la "faute de signe" chez Duhem.

Bromberg montre que l'équation (5) reçoit une double interprétation -- mécanique et électrique -- dans les deux parties du développement de la théorie de la lumière du mémoire PH.<sup>167</sup> La partie mécanique du raisonnement (où se localise la "faute de signe" dont nous parle Duhem) est celle où Maxwell obtient la vitesse de l'onde dans le milieu électromagnétique doué d'élasticité. Dans cette partie, l'équation (5) est interprétée, selon Bromberg, de la même façon que la loi de Hooke, où un déplacement de la position d'équilibre est à l'origine d'une force restauratrice qui s'oppose à lui. Le signe négative de l'équation porte donc cette signification.

La partie électrique est celle où Maxwell obtient le résultat selon lequel la constante  $E$  -- qui dans la partie mécanique a été liée aux propriétés élastiques du milieu -- est égale au rapport entre les unités électrostatique et électrodynamique de charge. Dans cette partie, Bromberg montre que la force électromotrice "R", dans l'éq. (5), est interprétée comme agissant dans le même sens du déplacement électrique "h", qui désigne alors une charge par unité de surface.<sup>168</sup>

Cette double interprétation est cautionnée -- comme le remarque Bromberg dans un autre article<sup>169</sup> par le mécanisme proposé par Maxwell, dans le mémoire PH, pour le milieu électromagnétique. La force électromotrice  $y$  est définie d'une façon ambiguë, tantôt comme une force extérieure qui agit sur les particules électriques, tantôt comme une force intérieure de réaction, exercée par la substance élastique des cellules sur les particules quand les cellules sont déformées en raison du déplacement de ces dernières.

A partir du mémoire DT Maxwell abandonne le mécanisme des vortices et particules, et l'équation (6) acquiert une signification uniquement électrique. Il n'a plus besoin alors de l'ambiguïté que le mécanisme du mémoire PH offrait dans l'interprétation de la grandeur "R" de l'équation (5).

La thèse de la "faute de signe" soutenue par Duhem, l'empêche

de voir ce rôle heuristique de la théorie des vortices moléculaires du mémoire PH. Une approche trop formaliste – non sans rapport avec l'épistémologie de Duhem – est incapable de rendre compte de la dynamique de la création scientifique. Duhem est-il concerné, d'ailleurs, par cette dynamique? Nous reviendrons à cette question plus tard.

Nous voudrions, finalement, aborder la thèse de la contradiction entre la "deuxième électrostatique" de Maxwell et sa "théorie de la charge".

Cette question est une des plus controversées et des plus complexes de l'électrostatique de Maxwell.

Bromberg épouse les mêmes thèses que Duhem sur l'interprétation des grandeurs "déplacement électrique" et "électricité libre" chez Maxwell. Ainsi il affirme que :

"Maxwell introduced displacement in 1862 (...) as a synonym for the polarisation, that is, the dipole moment per unit volume".<sup>170</sup>

Bromberg soutient donc, avec Duhem, que le "déplacement électrique" introduit dans le mémoire PH, n'était pas une grandeur nouvelle mais (...)

"... a new name for a known quantity. The equations in which it appeared were based on the known properties of dielectric polarization".<sup>171</sup>

Bromberg affirme, également, que:

"... Maxwell's theory was that charge is the manifestation of the process of dielectric polarization".<sup>172</sup>

Cette théorie de la charge aurait été adoptée par Maxwell, d'après cet auteur, à partir du mémoire DT.<sup>173</sup> Bromberg interprète donc la grandeur  $e$  comme "la densité de charge de polarisation", c'est à dire ce que Duhem nomme "densité fictive de charge".

Ces interprétations sont, néanmoins, à l'origine de certaines

inconsistances chez Maxwell, d'après Bromberg. Les inconsistances changent, toutefois, d'un écrit à l'autre.

D'après Bromberg, le changement de signe de la relation (5) entre déplacement et force électrique associé à l'expression pour l'électricité libre, qui est introduite pour la première fois dans le mémoire DT (éq. 1), engendre une incompatibilité avec la loi de Coulomb.

Dans le Treatise, une nouvelle formulation de l'électrostatique fait disparaître l'incompatibilité, puisque Maxwell écrit l'équation (7). Mais, selon Bromberg, ce changement de signe dans l'expression relative à l'électricité libre aura comme conséquence la perte de la signification qu'elle portait originellement. L'équation (7) ne sera plus compatible avec l'hypothèse selon laquelle la charge serait la manifestation d'un processus: la polarisation diélectrique. Bromberg soutient que Maxwell ne s'est pas aperçu que le changement effectué dans ses équations l'a éloigné des idées physiques sous-jacentes à son travail.<sup>174</sup>

Everitt, dans sa biographie de Maxwell, trouve cependant qu'il est possible de donner une interprétation consistante de la grandeur charge électrique chez ce savant:

"Maxwell current is not the motion of charge, but the motion of a continuous uncharged quantity (not necessarily a substance); his charge is the measure of the displacement of that quantity relative to space".<sup>175</sup>

La clef de cette conception chez Maxwell réside, selon Everitt, dans la théorie du mouvement d'un fluide incompressible du mémoire FA. Dans cette théorie la charge était l'analogie des "sources" et des "puits" dans les surfaces de séparation de deux milieux différents.

L'auteur concède, toutefois, que certaines propositions que l'on trouve chez Maxwell, ainsi que ses fréquentes fautes de signe, n'ont pas facilité les choses pour ses contemporains plus soucieux de rigueur.

Duhem et la Grandeur "Flux de Déplacement"  
chez Maxwell

La discussion autour du concept de courant de déplacement (ou, flux de déplacement) est bien caractéristique de la méthode utilisée par Duhem pour la critique des théories de Maxwell. Cette discussion, que l'on rapportera par la suite, a aussi beaucoup d'intérêt parce qu'elle constitue une application de la grille d'analyse singulière que Duhem avait utilisée déjà pour l'électrostatique. On y trouve aussi quelques idées caractéristiques de l'épistémologie Duhemienne qui sont au fondement du travail critique qu'il entreprend.

Nous avons vu comment Duhem essaie de rattacher les grandeurs de l'électrostatique de Maxwell à celles de la théorie des diélectriques de Poisson-Mossotti. Cette démarche semble répondre à une exigence centrale de son épistémologie, concernant le mode de croissance de la connaissance scientifique:

"Le théoricien cherche à donner des lois physiques une représentation construite au moyen de symboles mathématiques; cette représentation doit être aussi simple que possible; les grandeurs distinctes qui servent à signifier les qualités regardées comme premières et irréductibles doivent donc être aussi peu nombreuses que possible. Lors donc que des faits nouveaux sont découverts, que l'expérience en a déterminé les lois, le physicien doit s'efforcer d'exprimer ces lois au moyen des signes déjà en usage dans la théorie, de les formuler au moyen de grandeurs déjà définies. C'est seulement lorsqu'il a reconnu la vanité d'une semblable tentative, l'impossibilité de faire rentrer les lois nouvelles dans les anciennes théories, qu'il se décide à introduire dans la physique des grandeurs inusitées jusqu'alors, à fixer les propriétés de ces grandeurs par des hypothèses qui n'avaient pas encore été énoncées".<sup>176</sup>

Ici Duhem semble non seulement déployer une grille normative mais aussi prôner une heuristique. L'introduction d'une nouvelle grandeur est selon lui, une démarche qui ne peut pas suivre des règles logiques :

"Si l'on se place au point de vue de la logique pure, l'opération qui consiste à introduire dans une théorie physique de nouvelles grandeurs pour représenter des propriétés nouvelles, est une opération entièrement arbitraire; en fait, le théoricien se laisse guider, dans cette opération, par une foule de considérations étrangères au domaine propre de la physique, en particulier par les suppositions que lui suggèrent, touchant la nature des phénomènes étudiés, les doctrines philosophiques dont il se réclame, les explications que l'on prise en son temps et en son pays".<sup>177</sup>

Nous sommes tentés d'appliquer à ces considérations de Duhem les notions de "contexte de découverte" et "contexte de justification". Le contexte de découverte échapperait à toute normativité, mais les théories qui en sont issues doivent, néanmoins, être jugées "à posteriori". Les normes qui ont leur place dans le "contexte de justification" vont permettre à Duhem de juger l'introduction d'une grandeur dans les théories de Maxwell — celle de "flux de déplacement" — qui, contrairement à celle de "déplacement électrique", n'a aucun équivalent dans les théories alors adoptées. La démarche de Maxwell n'est pas compatible avec la normativité Duhemienne puisque (...)

"... aucune expérience, à l'époque où [Maxwell] écrivait, ne justifiât ni ne suggérât même une semblable hypothèse..."<sup>178</sup>

De cette anomalie Duhem prétend, cependant, donner des explications "historiques et psychologiques",<sup>179</sup> qui rendent l'hypothèse de Maxwell "très naturelle" ou, même, "forcée".

Pour ce qui est des circonstances historiques, Duhem reprend la thèse selon laquelle Maxwell s'est inspiré des "hypothèses" de Faraday et de Mossotti concernant la constitution des diélectriques, pour parvenir à l'idée des courants de déplacement. D'après ces hypothèses (...)

"... tout changement dans l'état de polarisation du diélectrique consiste en une modification de la distribution électrique sur les molécules conductrices; ce changement de polarisation est donc accompagné de véritables courants électriques, dont chacun est localisé en un très petit espace"<sup>180</sup>

Pour ce qui est des circonstances "psychologiques", Duhem n'offre pas d'éclaircissements. Fait-il une référence implicite à "l'esprit anglais" ? On pouvait bien le supposer, mais Duhem évite dans cet ouvrage ce genre de considérations, même si elles sont au coeur de plusieurs de ces écrits (voir la première partie de ce chapitre).

Après avoir examiné les circonstances de l'introduction, par Maxwell, de la nouvelle grandeur "flux de déplacement", Duhem va analyser son fonctionnement à l'intérieur de la théorie. Il se penche alors sur son rapport avec les autres grandeurs et sur son rôle clef pour l'élaboration de la théorie électromagnétique de la lumière.

Duhem signale que la grandeur flux de déplacement est à l'origine d'un principe qui bouleversera l'électromagnétisme. Il le formule de la façon suivante :

"Un flux de déplacement est essentiellement, et au même titre qu'un flux de conduction, un flux électrique; en tout corps conducteur diélectrique ou magnétique, il produit la même induction, la même aimantation, les mêmes forces électrodynamiques ou électromagnétiques qu'un flux de conduction de même grandeur et de même direction. Un courant ou un aimant exerce les mêmes forces sur un diélectrique parcouru par des flux de déplacement que sur un conducteur qui occuperait la place de ce diélectrique et dont la masse serait parcourue par des flux de conduction égaux à ces flux de déplacement".<sup>181</sup>

Duhem est convaincu que ce principe est déjà admis dans le mémoire PH. Nous verrons, toutefois plus loin, qu'il ne s'agit là que d'une illusion retrospective.<sup>182</sup>

Mais Duhem est intéressé, d'une façon plus particulière, à la genèse d'une proposition reconnue comme un des "principes essentiels" de la théorie de Maxwell, à savoir :

"L'hypothèse qu'en tout système, en toutes circonstances, le flux total est toujours uniforme...".<sup>183</sup>

Le "flux total" est, dans le langage Duhemien, le courant total, c'est à dire la somme du courant de conduction et du courant de déplacement. Si l'on désigne, en suivant Duhem, par  $(u, v, w)$  les composantes du courant de conduction, et par  $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$  les composantes du courant de déplacement<sup>184</sup>, "l'hypothèse" énoncée ci-dessus se traduit en langage mathématique par :

$$\frac{\partial}{\partial x} (\mu + \bar{\mu}) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu + \bar{\nu}) + \frac{\partial}{\partial z} (\omega + \bar{\omega}) = 0 \quad (8)$$

Dans une surface de discontinuité entre deux milieux 1 et 2, l'équation qui traduit cette hypothèse est<sup>185</sup> :

$$\begin{aligned} & (\mu_1 + \bar{\mu}_1) \cos(N_1, x) + (\nu_1 + \bar{\nu}_1) \cos(N_1, y) + (\omega_1 + \bar{\omega}_1) \cos(N_1, z) + \\ & + (\mu_2 + \bar{\mu}_2) \cos(N_2, x) + (\nu_2 + \bar{\nu}_2) \cos(N_2, y) + (\omega_2 + \bar{\omega}_2) \cos(N_2, z) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

où  $N_1$  et  $N_2$  sont les normales à la surface de séparation dirigées respectivement vers l'intérieur des milieux 1 et 2.

Une autre façon de traduire l'hypothèse de Maxwell exprimée par ces conditions serait d'affirmer que "les composantes du flux total vérifient la même relation que les composantes du flux au sein d'un liquide incompressible", ou encore que "le flux total, en tout système, correspond à un courant fermé et uniforme".<sup>186</sup>

On peut écrire, comme le fait Duhem, des relations analogues pour les courants de conduction et de déplacement pris séparément.

La condition de continuité pour un fluide établit une relation entre le flux de ce fluide et sa densité (volumétrique ou superficielle) pour un point donné, à un instant donné. Or, Duhem fait toujours une différence entre la densité de charge "vraie" et la densité de charge "fictive". A la première il associe les processus de conduction et à la deuxième les processus de polarisation diélectrique. Il écrit donc, à la suite des conditions (8) et (9) :

$$\frac{\partial(\sigma + \rho)}{\partial t} = 0 \quad (8')$$

$$\frac{\partial(\Sigma + E)}{\partial t} = 0 \quad (9')$$

où  $\sigma$  et  $\Sigma$  sont, respectivement, les densités volumétrique et superficielle de charge "vraie";  $e$  et  $E$  sont, d'une façon analogue, les densités de charge "fictive".

Les égalités (8') et (9') seraient selon Duhem, des conséquences de l'hypothèse de Maxwell de l'uniformité du flux total. Cette hypothèse pose, cependant, un grave problème, puisqu'on serait amené à conclure — dit-il — que (...)

"... les actions électrostatiques qui s'exercent dans le système restent les mêmes d'un instant à l'instant suivant".

Cette conséquence serait en désaccord avec (...) "les phénomènes électrostatiques les mieux constatés; ce serait, par exemple, nier qu'un condensateur puisse se décharger au travers d'un conducteur immobile jeté entre les deux armatures".<sup>187</sup>

Cette contradiction<sup>188</sup> apparente appelle une investigation sur la "formation" de l'hypothèse en question. Comme cela a été fait pour certaines grandeurs et relations en électrostatique, il s'agira de suivre les traces de cette hypothèse depuis le premier mémoire de Maxwell.

La grille que Duhem va utiliser pour cette enquête a été développée auparavant. Il s'agit de son interprétation des grandeurs "charge électrique" et "déplacement électrique" chez Maxwell et de sa thèse, qui en découle, sur l'existence de trois électrostatiques distinctes dans l'oeuvre du savant écossais.

Il serait trop long d'analyser ici les considérations de Duhem sur chaque mémoire de Maxwell. Nous nous limiterons aux enjeux des mémoires PH et DT.

La Condition d'Uniformité des Flux de Conduction et de Déplacement dans le Mémoire "On Physical Lines of Force"

Dans le mémoire PH, Maxwell introduit la notion de courant

de déplacement.

D'une part, Duhem considère que l'hypothèse de l'équivalence entre les courants de déplacement et les courants de conduction (en ce qui concerne leurs effets électrodynamiques et électromagnétiques) est déjà admise dans ce mémoire. D'autre part, il va soutenir que les courants de conduction sont "uniformes par définition" dans ce mémoire.

Pour fonder cette dernière thèse Duhem fait référence à l'interprétation que, dans la première partie du mémoire PH, Maxwell donne aux équations<sup>189</sup> :

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} \right) \\ q &= \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} \right) \\ r &= \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Maxwell montre, effectivement, que si  $(\alpha, \beta, \gamma)$  sont interprétées comme les composantes du champ magnétique,  $(p, q, r)$  auront les propriétés des composantes du courant électrique.

Comme Maxwell n'introduit les courants de déplacement que dans la troisième partie de son mémoire, on peut être sûr que  $(p, q, r)$  désigne, dans ce contexte, le courant de conduction. On peut donc obtenir facilement, à partir des équations (10), la condition d'uniformité pour les courants de conduction :

$$\frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} = 0 \quad (11)$$

Duhem essaie de justifier ce résultat à partir de la grille d'analyse qu'il a appliquée aux "électrostatiques" de Maxwell. La proposition qui traduit l'équation (11) serait, selon lui, une conséquence de la façon même dont Maxwell conçoit, dans le mémoire PH, la "charge électrique" :

"Cette proposition n'a d'ailleurs rien qui puisse surprendre dans un écrit où, implicitement, la densité électrique vraie  $\sigma$  est toujours supposée égale à zéro et où, seule, est introduite la densité électrique fictive  $\underline{e}$ , équivalente à la polarisation diélectrique"<sup>190</sup>

Nous retrouvons donc la thèse de Duhem sur la "théorie de la charge" chez Maxwell. Elle revient à admettre la condition  $\sigma = 0$ , qui implique la condition  $\frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0$ . Comme le courant de conduction est associé aux densités "vraies" de charge, l'équation (11) découle immédiatement.

Nous essayerons de montrer par la suite que la grille d'analyse utilisée par Duhem fausse totalement la démarche de Maxwell dans le mémoire PH. Exposons, rapidement, les principales étapes de cette démarche.

Nous avons signalé plus haut que les équations (10) sont données par Maxwell dans la première partie de son mémoire. Ces équations sont dérivées de la théorie des vortices moléculaires et possèdent donc, au premier abord, une interprétation mécanique. Ainsi  $(\alpha, \beta, \gamma)$  sont les vitesses tangentielles d'un vortex du milieu et sont censées représenter les composantes de la force magnétique (par unité de "masse" magnétique). L'interprétation de  $(p, q, r)$  comme le courant de conduction découle des effets mécaniques observés dans le "champ".

Dans la troisième partie du mémoire — qui est à plusieurs égards en rupture avec les deux premières parties — Maxwell introduit la notion de courant de déplacement. Il réconsidère alors les équations (10), de façon à incorporer les composantes du courant de déplacement (voir équation (5) :

$$\left. \begin{aligned} \frac{df}{dt} &= - \frac{1}{4\pi E^2} \cdot \frac{dP}{dt} \\ \frac{dg}{dt} &= - \frac{1}{4\pi E^2} \cdot \frac{dQ}{dt} \\ \frac{dh}{dt} &= - \frac{1}{4\pi E^2} \cdot \frac{dR}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

où  $(f, g, h)$  sont les composantes du déplacement électrique, et  $(P, Q, R)$  sont les composantes de la force électromotrice. Nous avons déjà défini plus haut le coefficient  $E$ , dans la discussion de l'équation (5).

Maxwell maintenant écrit, à la place des équations (10),

les équations :

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} - \frac{1}{\epsilon^2} \frac{dP}{dt} \right) \\ q &= \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\alpha}{dy} - \frac{d\delta}{dx} - \frac{1}{\epsilon^2} \frac{dQ}{dt} \right) \\ r &= \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} - \frac{1}{\epsilon^2} \frac{dR}{dt} \right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

où nous indentifions le dernier terme du membre droit de chaque équation comme la composante du courant de déplacement, donnée par les équations (12).

Duhem suppose qu'à partir des équations (13) la grandeur (p, q, r) va désigner le flux total, c'est-à-dire la somme du flux de conduction et du flux de déplacement. Maxwell écrit, après les équations (12), la "condition de continuité" pour le courant:

$$\frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} + \frac{de}{dt} = 0 \quad (14)$$

où  $\underline{e}$  désigne la "quantité d'électricité libre".<sup>191</sup>

Duhem écrit l'équation (14), en utilisant ses notations, de la façon suivante:

$$\frac{\partial(u+\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(v+\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(w+\bar{w})}{\partial z} + \frac{de}{dt} = 0 \quad (14')$$

Maintenant Duhem interprète donc (p, q, r) comme le courant total. Il convient de rappeler que la grandeur  $\underline{e}$  désigne, pour lui, la densité volumétrique de charge "fictive".

Duhem applique alors l'équation (11) dans l'équation (14'), pour obtenir :

$$\frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{w}}{\partial z} + \frac{de}{dt} = 0 \quad (15)$$

Il conclut au sujet du mémoire PH :

"Si donc, en ce mémoire, Maxwell définit les flux de conduction comme étant essentiellement uniformes, il n'a garde de poser le même postulat touchant les flux de déplacement".<sup>192</sup>

Nous verrons plus bas que l'interprétation Duhemienne de l'équation (14) du mémoire PH est problématique.

La Condition d'Uniformité des Flux de Conduction et  
de Déplacement dans le Mémoire "A Dynamical Theory  
of the Electromagnetic Field"

Dans le mémoire DT, Maxwell abandonne toute référence à un mécanisme sous-jacent au milieu électromagnétique. Les équations du "champ" sont posées d'une façon axiomatique.

Il écrit alors l'équation (1) entre les composantes du déplacement électrique et la quantité d'électricité libre. Nous renvoyons le lecteur aux commentaires qui ont été faits précédemment sur cette équation. Maxwell écrit aussi les équations du "mouvement total d'électricité": <sup>193</sup>

$$\left. \begin{aligned} p' &= p + \frac{df}{dt} \\ q' &= q + \frac{dg}{dt} \\ r' &= r + \frac{dh}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Dans les équations (16) le courant de déplacement est ajouté au courant de conduction (p, q, r) pour obtenir le courant total (p', q', r').

Au courant total est associé un effet magnétique exprimé par : <sup>194</sup>

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\delta}{dy} - \frac{d\beta}{dz} &= 4\pi p' \\ \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\delta}{dx} &= 4\pi q' \\ \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} &= 4\pi r' \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Finalement, Maxwell écrit la condition de continuité pour un "milieu qui conduit l'électricité": <sup>195+</sup>

$$\frac{de}{dt} + \frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} = 0 \quad (18)$$

Il n'y a donc, dans ce mémoire, aucune ambiguïté au sujet de l'interprétation des grandeurs (p, q, r). Elles désignent les composantes du courant de conduction.

Or, Duhem affirme <sup>196</sup> qu'il y a identité entre les mémoires PH et DT en ce qui concerne les propositions :

- a) Les flux de conduction sont uniformes, mais non pas les flux totaux (éqs. 11 et 14);

b) Les flux de déplacement ne sont pas uniformes (éq. 15).

Un simple examen des équations (16), (17) et (18) montre, toutefois, que l'interprétation de Duhem, exprimée par la proposition a, est fautive.

Effectivement, l'équation (18) exprime le fait que le courant de conduction n'est pas uniforme. Par contre, le courant total l'est. Il suffit de prendre le gradient de  $(p', q', r')$  dans les équations (17) pour obtenir cette condition.

La proposition b de Duhem est, effectivement, valable. Si l'on prend la dérivée par rapport au temps de l'équation (1), on obtient effectivement l'équation (15), compte-tenu de la différence de notation.

Nous signalons, cependant, que si l'on interprète de la même façon la grandeur e (l'électricité libre) dans les équations (1) et (18), il y a une incompatibilité entre ces équations et la condition d'uniformité du flux total qui découle des équations (17). Nous croyons, contrairement à ce qu'affirme Duhem, qu'on ne peut pas interpréter e indifféremment dans les équations (1) et (18) comme la densité de charge fictive. Maxwell n'éclaire pas cette question dans le mémoire DT.

De toute façon l'analyse de Duhem ne peut pas être retenue. Elle résulte d'une incompréhension du changement conceptuel opéré par Maxwell entre les mémoires PH et DT. Duhem est constamment tenté de projeter dans les premiers mémoires de Maxwell les acquis des travaux de maturité du savant écossais. La recherche d'une continuité, dictée par une logique que Duhem veut appliquer à une oeuvre qui s'étale pendant presque 20 ans, fautive la démarche Maxwellienne. Il est d'ailleurs remarquable que l'approche de Duhem mette en évidence certaines discontinuités tout au long de cette oeuvre mais, au même temps, soit incapable de rendre compte d'une logique du déplacement conceptuel dans cette trajectoire extrêmement créative. Toute discontinuité, quand elle n'est pas éliminée par une interprétation peu fidèle au texte, est considérée soit comme une "faute", soit comme un "stratagème" visant à éviter une contradiction trop flagrante.

Nous allons essayer, par la suite, de mettre en évidence les discontinuités entre les mémoires PH et DT, en ce qui concerne les deux pro-

positions qui regardent Duhem:

a) l'équivalence entre les effets électrodynamiques et électromagnétiques des courants de conduction et des courants de déplacement;

b) la condition d'uniformité du courant total.

Les Discontinuités entre le Deuxième et le Troisième Mémoires de Maxwell

Nous allons faire constamment appel, dans ce qui suit, aux analyses très intéressantes de J. Bromberg sur le statut des deux propositions citées plus haut, dans les mémoires PH et DT.<sup>197</sup>

Bromberg a montré, dans une analyse lucide, que ces deux propositions, quoique en germe dans la Prop. XIV du mémoire PH, ne peuvent cependant pas être déduites à partir des équations qui y figurent.

La proposition a peut-être formulée en langage vectoriel de la manière suivante:

$$\vec{C} = \vec{K} + \dot{\vec{D}} = \frac{1}{4\pi} (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \quad (17)$$

où  $\vec{C}$  est le courant total,  $\vec{K}$  le courant de conduction,  $\dot{\vec{D}}$  le courant de déplacement, et  $\vec{H}$  la force magnétique (intensité). Cette équation est identique à l'éq. (17) du mémoire DT (compte-tenu de l'éq. (16) de ce mémoire). L'éq. (17) peut être vue comme une généralisation de la loi d'Ampère.<sup>198</sup>

On pourrait croire, suivant Duhem, que l'éq. (17) est identique à l'éq. (13) du mémoire PH. Toutefois, si l'on interprète (p, q, r,) dans ce mémoire comme désignant le courant de conduction uniquement (suivant

Duhem), l'éq. (13) peut être écrite:

$$\vec{K} - \dot{\vec{D}} = \frac{1}{4\pi} (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \quad (19)$$

La différence entre cette équation et l'éq. (17) a comme origine le signe négatif des éqs. (12). Si l'on change le signe de ces équations on obtient, effectivement, l'éq. (17). Duhem semble donc supposer cette modification quand il attribue au mémoire PH la proposition a; ce qui d'ailleurs correspond tout à fait à sa thèse de la "faute de signe" qu'il impute à l'éq. (5) et, en conséquence, aux éqs. (12). Nous avons vu, cependant, que cette thèse de Duhem ne s'impose pas.

Bromberg signale, néanmoins, que si l'on exprime les éqs. (17) et (19) non pas en fonction du courant de déplacement, mais en fonction de la force électromotrice, il y a une identité formelle entre ces deux équations, respectivement écrites dans les mémoires PH et DT. On obtiendrait alors une équation de la forme:

$$\vec{K} = \frac{1}{4\pi} (\vec{\nabla} \times \vec{H}) - [\text{CONSTANTE}] \left( \frac{d}{dt} \vec{E} \right) \quad (13')$$

où  $\vec{E} = (P, Q, R)$  désigne la force électromotrice. Cette identité formelle est le résultat du changement de signe qui a lieu, entre ces deux mémoires, dans l'équation qui lie la force électromotrice au déplacement électrique (voir les éqs. (5) et (6)).

C'est sous la forme de l'expression (13') que Bromberg considère les éqs. (13) du mémoire PH comme contenant, en germe, la généralisation de la loi d'Ampère, que Maxwell effectuera seulement à partir du mémoire DT. Il est cependant très probable qu'à l'époque où il écrivait le mémoire PH, Maxwell n'ait pas entrevu la possibilité de cette généralisation.<sup>198</sup>

Bromberg signale, par ailleurs, que dans le mémoire PH Maxwell n'en avait pas besoin pour arriver aux résultats concernant l'identité des milieux électromagnétique et luminifère. Maxwell avait plutôt besoin

du signe négatif du dernier terme des éqs. (13), pour obtenir la bonne expression de la loi de Coulomb par la suite.<sup>199</sup>

En ce qui concerne la proposition b, elle est formulée dans le mémoire DT mais non pas dans le mémoire PH. Cette proposition peut être exprimée symboliquement par:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{C} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{K} + \dot{\vec{D}}) = 0 \quad (17')$$

Nous avons mis en évidence plus haut que l'éq. (17') découle de l'éq. (17) du mémoire DT. Dans le mémoire PH on déduit, par contre, à partir de l'éq. (19):

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{K} - \dot{\vec{D}}) = 0 \quad , \quad (19')$$

un résultat qui n'exprime pas la proposition b.

Bromberg montre que si l'on interprète (p, q, r) dans les éqs. (13) comme  $\vec{C}$ , le courant total, on arrive, de la même façon que Duhem, à l'équation:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{C} = - \frac{d\rho}{dt} \quad (14')$$

Cette équation est également incompatible avec la proposition b.

Maxwell n'était donc pas encore en possession, dans son deuxième mémoire, des résultats qui par la suite, seront considérés comme les plus caractéristiques de sa théorie. On ne peut donc pas comparer les équations des mémoires PH et DT, comme le fait Duhem, sans les considérer comme participant à des démarches tout à fait différentes au niveau de leur heuristique.

Duhem n'observe pas cette règle élémentaire des recherches historiographiques. Cela ne l'empêche pas d'affirmer, par la suite, qu'il y a

une incompatibilité entre la "deuxième électrostatique" de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière qui y est développée.<sup>200</sup>

La Théorie Electromagnétique de la Lumière  
dans l'Ouvrage de 1902

Nous avons dès le départ annoncé que notre objectif principal dans l'étude de l'ouvrage Les théories électriques de Maxwell était de mettre en évidence la structure de la critique Duhemienne. Pour y arriver, il a fallu rentrer dans les détails de cette critique concernant certains aspects des théories de Maxwell.

L'électrostatique s'y prêtait d'une façon exemplaire, et cela pour plusieurs raisons.

Nous croyons que la première partie de l'ouvrage de Duhem met en évidence, dans tous ces aspects essentiels, une approche particulière de l'oeuvre de Maxwell en électricité et magnétisme. Cette approche, dans sa structure, se reproduira dans l'analyse de l'électromagnétisme, dans la deuxième partie de l'ouvrage.

Duhem, juste au début, annonce que l'analyse qu'il fera des propositions de l'électromagnétisme de Maxwell sera du même type de celle qui nous venons de rapporter. Il réaffirme, effectivement, l'appréciation de la première partie de l'ouvrage, consacrée à l'électrostatique:

"La forme de ces propositions, la suite de déductions et d'inductions qui les fournit, varient d'un écrit à l'autre; nous devons donc analyser successivement chacun des mémoires composés sur l'électricité par le physicien écossais..."<sup>201</sup>

C'est dans l'électrostatique et l'électrocinétique que Duhem

développe la trame fondamentale de sa critique à Maxwell, en rapport avec les concepts de charge électrique et de déplacement électrique. La façon dont Duhem attache son analyse de la théorie électromagnétique de la lumière aux "électrostatiques" de Maxwell en est révélatrice.

Les fondements épistémologiques de la critique de Duhem à Maxwell transparaissent déjà nettement dans la partie de l'ouvrage que nous avons considérée.

Finalement, les raisons pour lesquelles Duhem rejettera, dans la "Conclusion" de son ouvrage, les théories de Maxwell, sont tout a fait compréhensibles grâce aux éléments qui ont été discutés jusqu'ici.

#### Le Choix en Faveur de la Théorie de Helmholtz

A la fin de l'ouvrage Les Théories Electriques de J. C. Maxwell, Duhem est fort d'avoir accompli une tâche que lui semblait fondamentale: montrer que l'ensemble des théories électriques de Maxwell est irrecevable. Et cela à cause de (...)

"... ces illogismes, ces incohérences [qui] ne sont pas, dans l'oeuvre du physicien anglais, des défauts de minime importance et faciles à corriger; d'illustres géomètres ont cherché à mettre de l'ordre dans cet oeuvre et ont dû y renoncer"<sup>202</sup>.

Néanmoins, Duhem n'est pas prêt à abandonner la théorie électromagnétique de la lumière, un acquis, qu'il considère comme définitif, de l'effort théorique de Maxwell.<sup>203</sup>

A partir de ce bilan, il va investiguer trois issues théoriques disponibles.

Il y a d'abord celle proposée par Hertz qui, devant un tel tableau, soutient qu'il faut retenir les équations du champ électromagnétique et abandonner la théorie qui leur a servi de fondement. L'épistémologie de Duhem ne peut cependant pas accepter cela en guise de théorie :

"... en physique, une équation, détachée de la théorie qui y a conduit, n'a aucun sens".<sup>204</sup>

Duhem considère ensuite la tentative de Boltzmann<sup>205</sup> de construire une théorie des phénomènes électromagnétiques sur des bases complètement différentes de celles de Maxwell. Cette théorie, pour arriver aux résultats obtenus par ce savant, a dû rejeter les théories "classiques" de ces phénomènes, représentées par les travaux de Poisson, F. Neumann, W. Thomson et G. Kirchhoff. Duhem ne peut pas admettre une théorie qui conduit à rompre avec cette tradition théorique.

Il reste l'électrodynamique de Helmholtz, qui concilie toutes les exigences de Duhem: elle aboutit à une théorie électromagnétique de la lumière et, au même temps, assure la continuité d'un programme théorique. La "doctrine" de Helmholtz est, affirme Duhem, un (...)

"... prolongement naturel des doctrines de Poisson, d'Ampère de Weber et de Neumann; elle conduit logiquement des principes posés au commencement du XIX<sup>ème</sup> siècle aux conséquences les plus séduisantes des théories de Maxwell, des lois de Coulomb à la théorie électromagnétique de la lumière; sans perdre aucune des récentes conquêtes de la science électrique, elle rétablit la continuité de la tradition".<sup>206</sup>

Ce qui nous semble paradoxal dans le cas Duhem c'est l'hybride d'une position théorique ultra-conservatrice — qui l'a placé définitivement dans le cadre de la physique qu'on appelle aujourd'hui "classique" — et d'un parti pris méthodologique anti-mécaniste qui portait en lui le renversement de cette même physique classique, accompli par Einstein .

SECTION VI.9- QUELQUES CONSIDERATIONS SUR LE CAS DUHEM  
DANS LA RECEPTION DES THEORIES DE MAXWELL

Dans l'introduction du présent chapitre nous avons affirmé que Duhem occupe une place à part dans l'histoire de la réception des théories de Maxwell en France.

Nous croyons qu'il faut chercher l'explication du "cas Duhem" dans l'interdépendance étroite entre les dimensions "scientifique", "épistémologique" et "historiographique" de son oeuvre. Si cela est sûrement vrai pour l'ensemble du travail théorique de Duhem, ses recherches en électricité et magnétisme constituent, probablement, un exemple privilégié de cette interdépendance.

Les "théories de Maxwell" représentaient ainsi pour lui un enjeu qui débordait le cadre du strictement "scientifique". La permanence de ce sujet tout au long de son oeuvre, en dépit du "consensus" de la communauté scientifique, semble corroborer cette thèse. La façon dont Duhem a mené son projet d'élaborer une électrodynamique sur les bases posées par Helmholtz en 1870 est également révélatrice de cette interdépendance.

Finalement les raisons de son refus d'emprunter les nouveaux programmes théoriques mis en place à partir du début des années 90 dans les domaines de l'électricité, du magnétisme et de l'optique, doivent aussi être cherchées dans la normativité que Duhem imposait au travail scientifique.

Dans ce chapitre nous avons analysé deux tentatives, fort différentes l'une de l'autre, de critique "scientifique" des théories de Maxwell: celle de l'article de 1894 et celle de l'ouvrage de 1902 de Duhem.

Nous avons mis en évidence que la critique Duhemienne des théories de Maxwell entreprise en 1894, supposait le cadre de l'électrostatique classique et de l'électrodynamique de Helmholtz. Duhem y faisait également appel aux réflexions de Hertz, datant de 1892, sur les théories du savant écossais. Cette critique, que nous avons montrée être contable à bien des égards, est toutefois cruciale, à notre avis, pour la légitimation du choix que fait Duhem, dès cette époque, en faveur de l'électrodynamique de Helmholtz.

En 1902 sa critique suit une toute autre démarche. Si la référence à l'électrostatique classique y joue toujours un rôle important — notamment en ce qui concerne les analyses sur le concept de charge électrique chez Maxwell — Duhem adopte une approche plus "interne". Les théories du savant écossais sont analysées en tant que telles, et non pas "traduites" dans un univers conceptuel qui leur est étranger. Le fil conducteur de cette critique est "historique": les objections que soulève Duhem se réfèrent à une succession de théories et non pas à une théorie prise isolamment. Nous avons souligné combien c'est inadéquat, pour rendre compte d'une logique du déplacement conceptuel chez Maxwell, de rechercher une continuité et une unité "logique" dans cette oeuvre. De toute façon Duhem n'avait sûrement pas cela pour objectif. Comme dans son article de 1894, son but en 1902 était de rejeter les théories de Maxwell (et tous les programmes qui les ont prises comme fondement) et de faire apparaître son choix théorique comme le seul valable. Nous croyons, néanmoins, que cette recherche d'une continuité dans l'histoire de la physique — révélée par la référence constante aux théories "classiques"

dans la critique de Maxwell et par la prise en compte de l'ensemble des écrits de ce savant — correspond à la conception qui se fait Duhem du mode d'existence historique de cette discipline. Nous reviendrons plus loin, à ce sujet.

Parallèlement à cette critique "scientifique" il y a également, dans des nombreux écrits de Duhem, une critique "meta-scientifique" des théories de Maxwell.

Les théories du savant écossais sont vues comme des produits de l'idéal de donner une explication mécanique des phénomènes physiques, ce qui combat Duhem. Cet "idéal" se réaliserait d'une façon particulière dans les théories de "l'Ecole anglaise", notamment à travers l'usage qui y est fait des "modèles".

Le mémoire PH est pris comme un exemple de l'usage de "modèles mécaniques" et de l'application d'une "méthode synthétique" dans l'élaboration de la théorie physique. Duhem soutient, toutefois, que l'appel fait aux modèles dans la physique anglaise est une conséquence d'un scepticisme quant'au but "explicatif" des théories physiques, et du discrédit dans lequel est tombée la "méthode synthétique". En conséquence les modèles ne remplissent, pour Duhem, qu'une fonction psychologique chez les "esprits imaginatifs".

Le mémoire DT et la théorie dynamique des circuits électriques du Treatise mettent en place, selon Duhem, une nouvelle méthode — la "méthode analytique" — qui s'appuie sur les techniques mathématiques développées en Mécanique Analytique.

Ces deux méthodes sont considérées comme des moyens de pour suivre un but unique: l'explication mécanique complète des phénomènes physiques. Duhem montre que ce but non seulement impose une contrainte nocive au travail scientifique, mais aussi que l'histoire a montré son infertilité. Dans un bilan que fait Duhem dans l'introduction de son ouvrage Energétique Générale de 1911, l'échec du "programme" mécaniste aurait été total, ce qui est vue comme une corroboration de son "examen logique" de l'objet légitime de la théorie physique.

La structure du Treatise de Maxwell est le reflet, pour Duhem, du scepticisme auquel nous avons fait allusion plus haut. Dans cet

ouvrage Duhem constate que le formalisme n'est que partiellement interprété, et que Maxwell y fait fonctionner des "modèles algébriques" incompatibles entre eux. L'usage des modèles est révélateur pour Duhem de l'abandon par la "Physique anglaise" de l'idéal métaphysique d'explication de la réalité, idéal qui avait été poursuivi tout au long de l'histoire de la physique.

Si Duhem défend la thèse que l'explication ne peut pas être un objet légitime de la théorie physique, il soutient, néanmoins, que toute théorie doit tendre vers une "classification naturelle" des lois physiques révélées par l'expérience. Dans cette perspective "l'ordre logique" de la théorie tend, affirme-t-il, à être le reflet d'un "ordre ontologique".

Cette conviction — Duhem la remarque — n'a aucun fondement logique, mais uniquement intuitif :

"... le physicien est forcé de reconnaître qu'il serait déraisonnable de travailler au progrès de la théorie physique si cette théorie n'est vue comme le reflet, de plus en plus net et de plus en plus précis, d'une Métaphysique; la croyance en un ordre transcendant à la Physique est la seule raison d'être de la théorie physique".<sup>207</sup>

Les Cartesiens et les Atomistes ont placé une Métaphysique à la base de la construction théorique. Pour Duhem elle n'est qu'un but, une limite, "le terme du progrès de la théorie". De cette façon il se démarque aussi bien des premiers que des Pragmatistes, qui ne voient dans la théorie physique qu'une utilité pratique, sans aucune "valeur de savoir".

Ici s'inscrit, à notre avis, le différend entre Duhem et Poincaré. Le premier soutient que "le rôle unique de la théorie physique n'est pas de suggérer des expériences, que ce n'en est même pas le rôle principal". Selon Duhem, "la théorie a pour but de classer et d'ordonner le chaos des faits qui l'expérience nous a révélés".<sup>208</sup>

Or, des savants comme Poincaré ont admiré les théories de Maxwell par leur pouvoir heuristique, dans leur condition "d'instruments de recherche".

Pour Duhem une théorie physique ne doit pas être jugée par des

critères heuristiques tels que: la production de nouveaux résultats théoriques ou la coordination insoupçonnée de domaines différents de phénomènes (même si cet aspect peut être une de ces "raisons du coeur" qui peuvent nourrir la "foi" des physiciens dans la valeur de la théorie en tant que reflet d'une "réalité").

Expliquons-nous mieux par un exemple, qui servira à appuyer notre thèse.

Duhem admet finalement, dans son ouvrage de 1902, que la théorie électromagnétique de la lumière représente un acquis définitif de l'effort théorique de Maxwell. Il accorde, sans doute, à ce dernier la priorité de ce résultat théorique (tout en signalant qu'à l'époque où ce résultat a été obtenu, il n'avait pas de base expérimentale et, en plus, qu'il se heurtait à une longue tradition de théories éther-élastiques de la lumière). Néanmoins cette évidence purement historique n'a pas une valeur épistémologique définitive pour Duhem. Si la théorie de Helmholtz, postérieurement à celle de Maxwell, réussit à son tour à produire aussi une théorie électromagnétique de la lumière (et cela d'une façon non indépendante et tout à fait AD HOC, visant obtenir les mêmes résultats de Maxwell) elle s'égalera, en fécondité, à la théorie de ce dernier. Ce type de donnée historique ne joue donc aucun rôle pour décider entre les deux théories. Cet aspect de l'épistémologie de Duhem est d'ailleurs tout à fait compatible avec l'objet qu'il assigne à la théorie physique: celle de classer les lois expérimentales. Le fait que la théorie devance ces lois n'a pas pour Duhem de valeur épistémologique.

L'objet qui assigne Duhem à la théorie physique le conduit à poser des critères strictes concernant leur structure. Nous avons vu que c'est là-dessus que s'est greffée la critique "scientifique" de la théorie de Maxwell.

La théorie de Helmholtz est tout à fait satisfaisante vis à vis des normes qui pose l'épistémologie de Duhem.

D'abord cette théorie présente une structure impeccable, évaluée par des critères logiques.

La théorie de Helmholtz a dû aussi plaire à Duhem par le fait

qu'elle ne se présente pas comme une tentative de dévoiler la nature des phénomènes. Helmholtz pose certaines hypothèses exprimées en langage mathématique, en déduit ensuite des conséquences, qu'il compare finalement avec l'expérience. Cette théorie se prête, ainsi, comme modèle pour Duhem d'une théorie physique qui vise uniquement "classer" les lois expérimentales et non pas les "expliquer".

En ce qui concerne le critère empirique, l'électrodynamique de Helmholtz développée par Duhem "rend compte — affirme ce dernier — de toutes les lois expérimentales que la théorie de Maxwell peut expliquer ...".<sup>209</sup> Nous avons rapporté dans ce chapitre l'effort théorique de Duhem visant montrer que la théorie de Helmholtz peut être utilisée comme une théorie interprétative des expériences de Hertz, Blondlot et d'autres sur la propagation des ondes électromagnétiques. Ces expériences ont pu alors servir à déterminer certains paramètres de la théorie.

Nous voudrions finalement souligner le rôle du critère historique dans le choix de Duhem en faveur de la théorie de Helmholtz.

Les théories de Maxwell auraient brisé, selon Duhem, une certaine tradition de recherches en électrodynamique, initiée par Ampère et continuée par plusieurs savants continentaux. La théorie de Helmholtz est vue, par contre, comme l'aboutissement naturel de cette tradition.

Cet aspect de sa pensée mérite qu'on s'y arrête. Si, pour Duhem, le choix d'un "principe" dans une théorie physique ne peut pas être régi par aucune norme "logique", ce choix demande, néanmoins, une "justification historique".<sup>210</sup> L'"esprit de finesse" doit guider le scientifique dans son travail, en plus des exigences de l'"esprit géométrique". Il y a un passage où Duhem formule d'une façon très claire ces exigences qui dépassent le cadre de la logique :

"Les hypothèses sur lesquelles reposent une théorie quelconque de Mécanique ou de Physique mathématique sont fruits dont la maturité a été longuement préparée; données de l'observation commune, résultats de l'expérience scientifique que secondent des instrumens; théories anciennes maintenant oubliées ou rejetées; systèmes métaphysiques, croyances religieuses même y ont contribué; leurs actions se sont croisées, leurs influences se sont mêlées d'une manière si complexe qu'il faut une grande finesse d'esprit,

soutenue par une connaissance approfondie de l'histoire, pour démêler les directions essentielles de la voie qui a conduit la raison humaine à la claire aperception d'un principe de Physique"<sup>211</sup>

A notre avis les références de Duhem à la tradition continentale en électrodynamique, à laquelle la théorie de Helmholtz se rattache, relève de cet ordre de considérations. Cette théorie est le résultat, selon lui, d'un parfait équilibre entre "l'esprit de finesse" et "l'esprit géométrique".

#### Le Développement de l'Electrodynamique de Helmholtz

La façon dont Duhem a mené son projet de développer l'électrodynamique de Helmholtz est également marquée par sa pensée épistémologique.

D'abord il est à signaler la permanence d'un seul cadre théorique dans les recherches de Duhem que nous avons analysées, et que couvrent une période qui va de 1894 à 1916. Cette continuité est d'autant plus étonnante que pendant cette période des multiples bouleversements conceptuels ont secoué la physique, en liaison étroite avec la recherche qui se faisait en électrodynamique.

Nous voyons dans ce fait un exemple de la méthodologie de Duhem en complète consonance avec son épistémologie.

D'abord il faut rappeler que pour Duhem l'EXPERIMENTUM CRUCIS n'existe pas, et que, donc, un désaccord éventuel entre les conséquences d'une théorie et les résultats de l'expérience n'est pas une raison suffisante pour rejeter cette théorie. Duhem a, en effet, montré que l'expérience de physique dépend toujours d'une ou de plusieurs théories interprétatives, et qu'elle n'offre jamais une donnée expérimentale brute.

Il y a, au moins en principe, la possibilité qu'un changement dans les hypothèses de base de la théorie rétablisse l'accord — qu'il considère sûrement comme nécessaire — avec l'expérience. Duhem soutient également qu'on ne peut pas savoir laquelle des nombreuses hypothèses qui sont à la base de la théorie physique doit être modifiée ou remplacée en cas de désaccord avec l'expérience.

Le physicien est libre alors de faire la modification qui lui semble convenir dans la structure théorique et de vérifier, par la suite, si cela permet d'éliminer l'incompatibilité avec l'expérience.

Duhem agit exactement de cette façon à la suite de son choix en faveur de l'électrodynamique de Helmholtz. Nous avons, en effet, vu comment Duhem modifie certaines hypothèses de cette théorie de façon à "assimiler" les résultats des expériences de Hertz et d'autres sur la propagation des actions électromagnétiques. Originellement Helmholtz avait supposé que les courants de conduction et de déplacement étaient équivalentes à l'égard de ses effets électrodynamiques et électromagnétiques. Duhem supposera, au contraire, que le facteur  $\Theta$  de cette équivalence est différent de l'unité, et il réussit alors à rendre compte des résultats expérimentaux, sans faire appel à l'hypothèse de Faraday-Mossotti. Plus tard, dans le but d'arriver à une théorie électromagnétique de la lumière, Duhem abandonne cette nouvelle hypothèse et re-introduit l'hypothèse de Faraday-Mossotti. Duhem pratique donc, le "conventionalisme" qu'il soutient dans ses réflexions épistémologiques.

Il est aussi à signaler la réticence initiale de Duhem à admettre une théorie électromagnétique de la lumière, simplement parce qu'elle ne découlait pas du cadre théorique qu'il adoptait à un moment donné.

Cette relative autonomie de la sphère du théorique chez Duhem — qui reste, pourtant, un empiriste — est aussi en harmonie avec l'objet qu'il assigne à la théorie physique de classer les lois expérimentales (et non pas de refléter une quelconque réalité).

Nous soutenons qu'une telle épistémologie peut conduire un programme théorique à la stérilité, puisqu'elle rend légitime l'attachement d'un savant à un certain cadre théorique à l'exclusion de tout autre et en dépit des "anomalies" qui se présentent.

D'un côté l'épistémologie de Duhem est trop permissive puisqu'elle ne fait aucune restriction "logique" aux procédés conventionalistes. Un savant peut, par exemple, faire appel à des démarches AD HOC pour "sauver" une théorie qui se confronte avec un démenti expérimental.<sup>212</sup>

En plus, la théorie physique n'a pas, pour Duhem, une quelconque valeur heuristique. Elle n'a pas le rôle de prévoir des nouveaux faits, de devancer l'expérience. Son but est uniquement de classer les lois expérimentales qui se trouvent suffisamment étayées dans un moment donné.

Nous croyons trouver dans ces éléments de l'épistémologie de Duhem une explication de son attachement à un seul cadre théorique en électrodynamique pendant une période de vingt ans.

Paradoxalement l'épistémologie de Duhem est, d'un autre côté, trop restrictive, comme nous verrons par la suite. Elle conduira Duhem à rejeter quelques alternatives théoriques qui se sont offertes à lui dans les années 90.

#### Duhem et l'Electrodynamique de Hertz

L'électrodynamique de Hertz de 1892 a été considérée par certains savants — dont Poincaré — comme une issue théorique aux difficultés qui présentaient les théories de Maxwell.

Nous avons déjà fait référence rapidement, dans la section précédente, aux raisons pour lesquelles Duhem s'est refusé à voir dans la formulation Hertzienne de la théorie de Maxwell, une solution valable aux objections soulevées contre cette dernière théorie.

Duhem fait le point sur cette question dans deux articles: "Quelques réflexions sur la science allemande" et "De Maxwell et de la manière allemande de l'exposer",<sup>213</sup> écrits en 1915.

Pour Duhem l'équilibre entre l'"esprit de finesse" et l'"esprit géométrique" qui avait caractérisé les recherches en électricité et en électricité et en magnétisme en Allemagne de Weber à Helmholtz, aurait été brisé par Hertz. Duhem affirme son étonnement à l'égard du fait que cet élève de Helmholtz, au lieu de donner suite au programme de son maître en électrodynamique, ait préféré adopter le point de vue de Maxwell, en dépit des difficultés signalées dans les théories du savant écossais :

Des objections aussi nombreuses que graves barraient la route aux méthodes diverses par lesquelles Maxwell avait tenté de justifier les équations qu'il souhaitait d'obtenir. Pour se débarrasser d'un seul coup de toutes ces objections, un moyen s'offrait, simple jusqu'à la brutalité; ce moyen, c'était de ne plus voir, dans les équations de Maxwell, des objets de démonstration, de n'en plus faire les termes d'une théorie à laquelle les lois communément reçues de l'Electrodynamique dussent servir de principes; c'était de les poser d'emblée à titre de postulats dont l'Algèbre n'aurait plus qu'à dévider les conséquences".<sup>214</sup>

Ce choix méthodologique de Hertz est la manifestation pour Duhem d'un esprit géométrique développé en outrance, et qui laisse de côté même des "vérités accessibles à tous", des données du "sens commun", comme l'existence d'un aimant permanent. La théorie de Maxwell n'est pas capable, selon lui, de rendre compte de cette "donnée", une raison de plus pour la rejeter.

Admettre les équations de Maxwell est donc considéré par Duhem, comme une preuve de l'incapacité de l'esprit géométrique d'établir un pont entre les conséquences de la théorie et les résultats expérimentaux, ce qui relève de l'esprit de finesse.

Duhem voit dans l'électrodynamique de Hertz une tentative de "réduire la Physique à l'Algèbre".<sup>215</sup> Hertz aurait posé les équations de Maxwell comme des postulats, "sans aucun raisonnement propre à les justifier, sans aucune analyse apte à les introduire...". Ensuite, "par un simple jeu de calculs", Hertz en aurait déduit "des conséquences purement algébriques (...) sans qu'à aucun moment, le moindre regard fût jeté sur la réalité, le moindre rapprochement tenté entre les formules et l'expérience".<sup>216</sup>

Cette issue théorique de Hertz est, toutefois, "illusoire" aux yeux de Duhem :

"Un ensemble d'équations peut contenir tous les éléments essentiels d'une théorie algébrique, dont les formules les plus variées s'obtiendront par combinaison de ces éléments. Il ne saurait suffire à condenser et résumer une théorie physique. On aura beau, en effet, soumettre ces équations aux transformations algébriques les plus compliquées et les plus habiles, on n'en tirera jamais la prévision ni l'explication du moindre phénomène. Pour que les formules obtenues par transformation et combinaison de ces équations puissent représenter quelque loi physique, il faudra qu'une certaine correspondance ait été établie entre les lettres écrites dans ces formules et les grandeurs mesurées par les appareils du laboratoire".<sup>217</sup>

Duhem affirme ainsi que le "sens physique" des équations est fourni par les "instruments et les procédures de mesure".<sup>218</sup>

En plus de simplement "poser" les équations de Maxwell, Hertz aurait dû, selon Duhem, donner la "définition physique" de chaque grandeur qu'y figure, et aussi "justifier les procédés expérimentaux qui permettent de mesurer ces diverses qualités".<sup>219</sup>

La façon dont Hertz conçoit la théorie physique empêcherait même de poursuivre le but que Duhem assigne à la théorie physique :

"Remplacer, donc, une théorie par les équations auxquelles elle aboutit, c'est la fixer, c'est la figer, c'est la rendre impropre aux modifications, aux extensions qui en pourraient assurer le progrès".<sup>220</sup>

Pour Duhem la seule option conforme à son épistémologie (...)

"... c'était de modifier très légèrement les théories du physicien écossais, si légèrement qu'aucune conséquence, comparable à l'expérience, n'en fût sensiblement changée, puis, avec les doctrines classiques, d'accorder le système aussi corrigé".<sup>221</sup>

Cette tâche aurait été accompli par Helmholtz et Duhem, lui -

même, a essayé de la compléter en vue de rendre compte des nouvelles données expérimentales.

L'attitude de Duhem à l'égard de la formulation Hertzienne de la théorie de Maxwell marque donc, nettement, les limites de son "conventionalisme" et met en relief, à notre avis, le caractère empiriste de son épistémologie.

### Duhem et la Théorie des Electrons

Dans son ouvrage L'évolution de la Mécanique (1903) Duhem cite les théories de Lorentz comme appartenant à cette classe de théories physiques élaborées suivant la "méthode synthétique" et visant l'explication mécanique des phénomènes physiques.<sup>222</sup>

Nous avons déjà signalé, également, le passage de sa Notice (1913) où Duhem se refuse d'attribuer à la "notion d'électron" une quelconque objectivité. Cette "hypothèse" ne fait que remplir la fonction psychologique d'un "modèle".

Dans son article de 1915, "Quelques réflexions sur la science allemande", Duhem prend à nouveau en considération la théorie des électrons de Lorentz. Cette théorie y est rejetée, ainsi que l'électrodynamique de Hertz, par le simple fait, qu'elle sous-tend la théorie de Maxwell :

"Cette Physique — affirme Duhem — reposait (...) tout entière sur une simple généralisation des équations de Maxwell".<sup>223</sup>

Il fait ici référence à l'introduction d'un nouveau terme dans ces équations relatif au "courant de convection" qui est assimilé à un "courant d'électrons".<sup>224</sup>

Duhem s'étonne alors de la prétention de la théorie des électrons, dont les fondements seraient viciés, à vouloir mener une critique des principes de la Mécanique :

"La Mécanique rationnelle, cette soeur aînée des théories physiques, que toutes les doctrines plus jeunes avaient, jusqu'alors, prise pour guide, dont elles s'étaient même efforcées, bien souvent, de tirer tous leurs principes; la Mécanique rationnelle, dison-nous, se vit, par la nouvelle venue, ébranlée jusque dans ses fondemens; au nom de la Physique des électrons, on proposa de renoncer au principe d'inertie, de transformer entièrement la notion de masse; il le fallait pour que la doctrine nouvelle ne fût pas contredite par les faits. Pas un instant, on ne s'est demandé si cette contradiction, au lieu d'exiger le bouleversement de la Mécanique, ne signalait pas l'inexactitude des hypothèses sur lesquelles repose la théorie électronique et ne marquait pas la nécessité de les remplacer ou de les modifier. Ces hypothèses, l'esprit géométrique les avait posées à titre de postulats; il en déroulait les conséquences avec une imperturbable assurance, triomphant des ruines mêmes qu'amoncelait, parmi les doctrines anciennement établies, le passage de la théorie du passé, instruit par l'histoire des grands progrès scientifiques, l'esprit de finesse, en cette marche dévastatrice, soupçonnait une mauvaise marque de vérité".<sup>223</sup>

Ce passage et celles qui la suivent dans l'article de 1915, nous semblent extrêmement importants pour la caractérisation de l'interdépendance entre la réflexion épistémologique et le travail scientifique de Duhem.

La "Physique nouvelle", comme l'appelle Duhem, aurait été complètement dominée par l'"esprit géométrique". Nous avons rapporté, plus haut, cette même critique lancée contre l'électrodynamique de Hertz. L'évidence pour Duhem du manque d'"esprit de finesse" de la "Physique nouvelle" est le mépris pour l'histoire d'un côté, et le mépris pour le "sens commun" de l'autre côté.

La Mécanique Rationnelle représente pour Duhem la culminance d'un effort théorique séculaire, et cette détermination, disons, "historique", est une donnée majeure pour lui. La "valeur de savoir" d'une théorie physique est à la mesure, pour Duhem, d'un progrès scientifique

accompli au long de l'histoire, et que seul l'"esprit de finesse" peut déceler. Cet aspect de la pensée de Duhem est remarquable puisqu'il reflète l'unité de sa réflexion épistémologique, historiographique et scientifique.

La critique de Duhem de l'idéal d'une explication mécanique des phénomènes physiques ne doit donc pas être prise comme une mise en cause de la place épistémologique privilégié qu'il accorde aux principes fondamentaux de la Mécanique Rationnelle. Là-dessus aussi la position de Duhem semble conservatrice et peut expliquer son refus à admettre les bouleversements de ces principes par la "Physique nouvelle".

Un autre aspect que nous voudrions simplement signaler, sans prétendre l'approfondir ici, est la place du "sens commun" dans la réflexion de P. Duhem. La "Physique nouvelle" — et dans ce contexte il fait référence explicitement à la théorie de la relativité restreinte, dont il semble considérer comme issue du même effort théorique qui a engendré la théorie des électrons<sup>225</sup> — serait en contradiction avec les "intuitions du sens commun". Ainsi le "principe de relativité", qui Duhem présente comme établissant une dépendance entre les notions d'espace et de temps, serait contraire à l'intuition courante qui perçoit ces notions comme étant indépendantes. Il conclut :

"L'esprit exclusivement géométrique ne veut pas concéder à l'esprit de finesse le pouvoir de tirer du sens commun, où elles étaient contenues, certaines connaissances douées de cette extrême évidence qui n'a pas la conviction des démonstrations, mais qui en a toute la certitude".<sup>226</sup>

Ce même appel au "sens commun" conduit également Duhem à rejeter les géométries non-euclidiennes.<sup>227</sup>

Nous croyons pouvoir conclure que la place singulière qui occupe Duhem dans la réception des théories de Maxwell en France s'explique par une remarquable cohérence entre la méthodologie qui utilise ce savant dans ses recherches en physique et son épistémologie. La normativité qui pose cette épistémologie a eu comme conséquence de rendre les recherches de Duhem en électrodynamique marginales par rapport aux choix théoriques qui ont façonné la physique du XX<sup>ème</sup> siècle.

## C O N C L U S I O N

" It is not by discoveries only, and the registration of them by learned societies, that science is advanced. The true seat of science is not in the volume of Transactions, but in the living mind, and the advancement of science consists in the direction of men's minds into a scientific channel; whether this is done by the announcement of a discovery, the assertion of a paradox, the invention of a scientific phrase or the exposition of a system of doctrine. It is for the historian of science to determine the magnitude and direction of the impulse communicated by either of these means to human thought..."

James Clerk MAXWELL

Maxwell, quand il écrivait ces lignes, ne se doutait pas qu'elles allaient traduire la seule perspective adéquate pour comprendre la réception de ses propres théories en électricité et en magnétisme.

Nous avons vu que la simple publication des mémoires et ouvrages de Maxwell en électricité et en magnétisme n'a pas été suffisante pour "canaliser" les savants français dans la "direction" qui allait placer cette oeuvre parmi les plus révolutionnaires de l'histoire de la Physique. Nous avons fourni des évidences qui montrent que les théories de Maxwell ne s'incorporent au cadre théorique des recherches en France que dans le courant des années 80.

On pourrait être tenté d'écrire l'histoire à rebours: partir

de ce consensus contemporain sur la portée de la "théorie de Maxwell" et considérer le tableau que nous avons dépeint de sa réception en France comme une anomalie. Dans cette perspective on verrait d'un côté une théorie "vraie", une méthodologie "féconde" et un savant "incompris", de l'autre côté une communauté scientifique adoptant des théories "fausses" et préconisant une méthodologie "stérile". Ce cadre théorique et méthodologique serait appelé à expliquer alors l'"aveuglement" des savants français, leur "résistance" aux théories de Maxwell, et mettrait en évidence les "obstacles" qui ont dû être surmontés pour qu'elles soient finalement admises.

Un tel regard sur le passé des sciences a une fâcheuse coloration inductiviste qui attache aux produits de la recherche scientifique une valeur de vérité intrinsèque et définitive. L'historiographie des sciences contemporaine a dû refuser cette approche, incapable de **rendre compte de la dynamique réelle du changement scientifique.**

Notre travail prétend avoir montré qu'un autre point de vue est nécessaire pour appréhender le processus par lequel les théories de Maxwell en électricité et en magnétisme sont arrivées à "canaliser" la pensée scientifique du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Dans le passage que nous avons cité, Maxwell exprime une idée de l'histoire des sciences où celle-ci n'est pas conçue comme une simple accumulation progressive de résultats, des facteurs de divers ordres contribuant essentiellement à la façonner et à déterminer sa "direction".

Nous pouvons pousser plus loin les propos de Maxwell et contester la thèse selon laquelle le "contenu" et la "portée" d'une théorie, ou d'un autre résultat de l'activité scientifique sont, dès leur publication, acquises et accessibles à une lecture "correcte".

Contrairement à ce qu'affirme une thèse assez répandue sur la nature du travail scientifique "normal", c'est souvent à travers la confrontation de deux cadres conceptuels distincts que des contenus "nouveaux" et toute la portée de la théorie peuvent émerger.

L'histoire de la réception des théories de Maxwell en France, telle qu'elle se dégage de ce travail, peut ainsi être vue,

d'un côté comme l'histoire de l'explicitation même de ces théories et des présupposés méthodologiques qui ont présidé à leur élaboration.

D'un autre côté elle se présente comme l'histoire de la modification graduelle du cadre théorique et méthodologique adopté par la communauté scientifique française au contact de ces théories.

Les résultats de nos recherches viennent en appuie de la thèse selon laquelle le rapport dynamique qui s'établit entre une théorie qui est transmise et des savants qui la reçoivent, constitue le moteur même du développement scientifique.

Nous avons vu que les théories de Maxwell ont été reçues en France initialement dans le contexte d'une adhésion de la communauté scientifique à des théories concurrentes.

En électrostatique la référence principale était la théorie des milieux diélectriques de Poisson-Mossotti qui admettait l'hypothèse d'une action électrostatique se transmettant à distance. Dès 1845 W. Thomson avait démontré que les nouveaux phénomènes découverts par Faraday en rapport avec les milieux diélectriques pouvaient être tout aussi bien expliqués par la théorie de Poisson-Mossotti, et qu'ils ne pouvaient donc pas trancher en faveur de l'hypothèse selon laquelle l'action se transmet de proche en proche.

Nous avons mis en évidence, dans l'Appendice A, l'impact probable de cette preuve sur la communauté scientifique française du milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ce résultat était encore souligné dans les cours de physique des années 80 que nous avons analysés.

La théorie de Helmholtz de 1870, en reformulant la théorie de Poisson-Mossotti de façon à attribuer au vide lui-même des propriétés diélectriques, a sûrement augmenté la crédibilité de l'approche traditionnelle des milieux diélectriques.

Poincaré a montré en 1888, d'une façon analogue à Helmholtz, que des nombreuses conséquences de l'électrostatique de Maxwell pou -

vaient être obtenues en introduisant des modifications dans les hypothèses de base de la théorie de Poisson-Mossotti.

L'électrostatique de Maxwell présentait, du point de vue des savants continentaux, des difficultés, notamment en ce qui concerne l'hypothèse selon laquelle la charge électrique serait le résultat d'un processus: la polarisation diélectrique. Nous avons rapporté les analyses de Mathieu, de Brillouin, de Poincaré et de Duhem à ce sujet, qui supposaient comme cadre interprétatif la théorie de Poisson - Mossotti.

La théorie de Maxwell de l'état de contrainte dans le milieu diélectrique a aussi fait l'objet de nombreuses critiques. Cette théorie était d'un côté difficilement conciliable avec le type d'élasticité qui était attribué à l'éther luminifère, ou avec celui des corps ordinaires. D'un autre côté, l'état de contrainte supposé par Maxwell était en contradiction avec les tentatives — comme celle de Poincaré — de donner une interprétation mécanique de la notion de "déplacement électrique".

Si les savants français ont fait souvent violence à la logique interne de l'entreprise théorique Maxwellienne, leurs analyses ont, néanmoins, le mérite indéniable d'exhiber l'originalité et aussi les limites de la voie empruntée par Maxwell.

Le degré d'indétermination dans lequel sont restés les concepts de charge électrique et de courant électrique dans les théories de Maxwell, ainsi que le problème de l'interaction entre l'éther et la matière s'est révélé, en effet, un handicap sérieux pour ceux qui se sont maintenus dans ce cadre théorique et qui ont essayé de le perfectionner.

Il a fallu, en effet, l'apport des théories continentales pour que ces problèmes soient surmontés dans le cadre de la théorie des électrons de Lorentz.

Les critiques des savants français aux théories de Maxwell doivent être appréciées non seulement par rapport à la cohérence interne de l'entreprise théorique Maxwellienne, mais aussi dans la perspective de la synthèse théorique des années 90.

Dans l'Appendice B nous avons montré qu'en électrodynamique, également, les recherches continentales étaient "progressives" et arrivaient à rendre compte assez bien des phénomènes alors connus. L'électrodynamique de Weber, malgré les objections qui ont été soulevées par Helmholtz, était universellement admise dans les années 50, quand Maxwell a publié ses premiers mémoires.

Avec l'électrodynamique de Helmholtz de 1870 — qui appartenait à la tradition continentale initiée par Ampère — même les conséquences les plus séduisantes des théories de Maxwell ont été incorporées dans le cadre théorique continental.

Nous avons montré l'importance qui sera attribuée, dans les années 80, à la comparaison inter-théorique des théories de Maxwell et de Helmholtz. Poincaré a montré que sous certaines conditions formelles il était possible d'accorder les classes de conséquences des deux théories. Ce savant affirmait aussi tard que 1890 — c'est-à-dire après les fameuses expériences de Hertz — que ces conditions de passage ne pouvaient pas encore être corroborées empiriquement d'une façon décisive. A ce niveau donc, la théorie de Maxwell ne s'imposait pas encore, à cette époque, sur la théorie de Helmholtz.

Les problèmes que posait l'électrostatique de Maxwell à des savants comme Brillouin, les ont conduit à considérer les conséquences de la théorie du savant écossais comme seulement "approchées" et non pas "rigoureuses". La théorie de Helmholtz était adoptée avec les conditions aux limites qui permettaient d'accorder ses conséquences avec celles des théories de Maxwell corroborées par l'expérience.

Duhem, au contraire, a critiqué en 1894 cette démarche théorique du "passage" de la théorie de Helmholtz à celle de Maxwell. Puisqu'il se refusait à accepter la théorie de Maxwell ainsi que les alternatives théoriques qui s'offraient dans les années 90, la seule décision légitime était, pour lui, de modifier la théorie de Helmholtz de façon à l'accorder aux nouvelles données expérimentales, en particulier celles des expériences de Hertz. Nous avons analysé les fondements de cette option de Duhem et comment elle est devenue graduellement marginale par rapport aux principaux programmes de re-

cherches en électromagnétisme et en optique de l'époque. Le "cas Duhem" est singulier au sein de la communauté scientifique française et ne peut être compris qu'en se référant à ses conceptions épistémologiques.

Il ressort de notre travail que l'attachement des savants français à l'électrostatique et à l'électrodynamique continentales pouvait se justifier sur le plan théorique et empirique, même, bien après la publication du Treatise on Electricity and Magnetism de Maxwell .

En plus, ce choix n'a pas représenté un "obstacle" au développement scientifique, puisque les théories continentales ont participé d'une façon décisive aux progrès qui ont assuré aux théories de Maxwell la place qu'on leur assigne de nos jours.

Comme nous l'avons déjà signalé, la théorie des électrons de Lorentz a emprunté des éléments conceptuels à chacune de ces traditions de recherche en électricité et en magnétisme. Nous devons par exemple à cette théorie, et non pas à celle de Maxwell, la séparation entre le "champ" et la "matière", qui a résulté de l'adoption d'une approche microscopique des phénomènes dans l'esprit des théories électriques continentales.

Hertz lui-même ne serait peut être pas arrivé à "découvrir" les onduations électromagnétiques sans une référence initiale à l'électrodynamique de Helmholtz.

En réalité, Maxwell ne songeait pas à la place que ses théories allaient occuper dans l'histoire des sciences. Il n'a pas eu une entière conscience de leur portée. Ainsi, il n'a pas vraisemblablement entrevu la conséquence capitale de ses équations: le phénomène d'irradiation électromagnétique à partir de sources électriques. La perspective d'une unification des domaines de l'Optique et de l'Electromagnétisme - fondée sur l'hypothèse de l'identité des milieux luminifère et électromagnétique - ainsi que son souci d'éviter des hypothèses sur la nature du courant électrique, l'ont probablement empêché d'anticiper les résultats de l'expérience de Hertz de 1888. L'idée même d'un champ ayant un statut autonome et indépendant de la

**matière** était étrangère à Maxwell. Finalement, toutes les implications de ses théories ne pouvaient pas ressortir dans le contexte d'un attachement à l'idéal d'une théorie mécanique complète des phénomènes électromagnétiques. Maxwell ne soupçonnait pas que cet idéal était irréalisable et que ses équations étaient, en réalité, incompatibles avec les fondements de la Mécanique Classique.

Considérons maintenant l'optique, pour compléter le cadre théorique qui nous concerne dans ce travail. Nous avons suggéré que **l'intérêt pour les théories de Maxwell a été éveillé en France**, probablement par les conséquences optiques de ces théories. Les références de Verdet et de Potier à la théorie électromagnétique de la lumière semblent appuyer cette thèse.

Néanmoins, le projet d'une théorie électromagnétique de la lumière n'a pas été une condition suffisante d'une adoption des théories du savant écossais par la communauté scientifique française. Elle n'a pas permis, initialement, de lancer les bases d'un programme de recherches en optique.

D'un côté, nous avons fourni des évidences suivant lesquelles le programme concurrent des théories éther-élastiques de la lumière dominait le scénario théorique en France, et cela au moins jusqu'à la théorie de Boussinesq de 1868, qui a représenté un progrès dans ce programme. En plus, ces théories admettaient une interprétation mécanique plus immédiate, tandis que la théorie électromagnétique de la lumière se montrait rebelle à une telle interprétation.

Pour au moins une partie de la communauté scientifique française cette réduction était une exigence fondamentale, et cela au moins jusqu'aux critiques de Poincaré de 1890.

D'un autre côté, si la théorie électromagnétique de la lumière a réussi à expliquer certains phénomènes qui faisaient problème dans l'approche éther-élastique, elle était loin d'être complètement satisfaisante du vivant de Maxwell. Il a fallu attendre la théorie des électrons de Lorentz pour que certaines anomalies soient finalement résolues.

L'expérience de Hertz de 1888, si elle a sans doute été

appréciée comme une corroboration de certaines hypothèses et résultats des théories de Maxwell, n'était cependant pas considérée comme une preuve de la nature électromagnétique de la lumière.

Nous avons vu également, que la théorie de Helmholtz était en mesure de fournir une théorie électromagnétique de la lumière, comme l'ont montré Helmholtz lui-même et, plus tard, Duhem.

Nous concluons que jusqu'à la fin des années 80 au moins, les théories de Maxwell ne s'imposaient pas face aux théories concurrentes. Le choix en faveur de ces dernières pouvait se justifier et c'est la synthèse de ces approches théoriques qui va permettre avancer, dans les années 90, la recherche dans les domaines de l'électrodynamique et de l'optique.

Mais d'autres "facteurs", de nature méthodologique et épistémologique, jouent un rôle essentiel dans l'activité scientifique, comme Maxwell le suggère dans l'extrait que nous avons cité en tête de cette conclusion. Le cas de la réception en France des théories de ce savant en électricité et en magnétisme est tout aussi exemplaire.

Nous avons souligné, dans ce travail, le pluralisme méthodologique que Maxwell met en pratique dans son oeuvre en électricité et en magnétisme. Ce pluralisme a été mis en évidence notamment par Duhem, qui a commenté l'usage des méthodes d'"analogie", "synthétique" et "analytique" chez Maxwell.

Cette pratique scientifique contrastait avec le monisme méthodologique qui prédominait vraisemblablement en France à l'époque. Le tableau du "lecteur français" que dépeint Poincaré dans l'introduction d'Electricité et Optique correspond, à notre avis, à une réalité historique.

Nous avons soutenu que les réactions de J. Bertrand aux théories de Maxwell sont représentatives de cette méthodologie du "lecteur français", qui fixait à la théorie physique l'objectif d'expliquer et

de révéler la "nature" des phénomènes. Cette "nature" était supposée mécanique et les hypothèses de base de la théorie physique devaient faire appel à certaines grandeurs puisées dans un champ conceptuel restreint, défini préalablement. En France, ce cadre conceptuel a été hérité des programmes mis en place dans la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle par Laplace, Poisson, Fresnel, Fourier et Ampère, notamment.

Dans la poursuite du but d'explication des phénomènes, la méthodologie du "lecteur français" imposait également des normes strictes concernant la "structure" de la théorie physique.

Nous avons vu combien les théories élaborées par Maxwell s'éloignaient de cette normativité méthodologique. D'abord, Maxwell a fait appel, comme nous l'avons dit plus haut, à plusieurs méthodes différentes dans son oeuvre en électricité et en magnétisme.

Or, la méthode d'analogie physique que Maxwell utilise dans son premier mémoire ne saurait aboutir à une théorie physique, comme celles de la tradition de la Physique Mathématique française. Maxwell par ailleurs, l'admettait aussi, mais il espérait que cette méthode ouvre les portes d'une théorie nouvelle des phénomènes électriques et magnétiques.

La théorie physique à laquelle Maxwell est parvenu dans son deuxième mémoire, faisait appel à des hypothèses de base inacceptables du point de vue de la normativité méthodologique prédominante en France. Il est significatif de signaler, dans ce contexte, que Brillouin, Mathieu et Poincaré n'ont pas admis, dans leurs tentatives d'interprétation mécanique des théories de Maxwell, une constitution composite du milieu électromagnétique.

Finalement, la "méthode analytique", que Maxwell utilise dans son troisième mémoire et dans le Treatise on Electricity and Magnetism, ne saurait aboutir aux explications mécaniques souhaitées par le "lecteur français". Les objections de Bertrand sont significatives à ce sujet.

En ce qui concerne la "structure" des théories de Maxwell, en particulier de l'ouvrage que nous venons de citer, elle était inadmissible face à la normativité hypothético-déductive stricte qui était

pronée en France.

Au début des années 90, la méthodologie qui prédominait en France a été analysée, dans ses fondements épistémologiques, par Poincaré et par Duhem. Nous y reconnaissons l'impact de l'affirmation de l'oeuvre de Maxwell en électricité et en magnétisme. Les références constantes de ces deux savants français à cette oeuvre nous semble corroborer cette thèse.

Poincaré et Duhem ont discuté la méthodologie de Maxwell au sein d'une réflexion épistémologique sur l'"objet" et la "structure" de la théorie physique.

Pour ces deux savants la théorie physique n'a pas pour but de dévoiler l'"essence" des phénomènes, ou leur "vraie nature".

Chez Poincaré cette thèse est soutenue, en rapport avec les théories de Maxwell, dans l'introduction de Electricité et Optique. Dans ce contexte il visait l'exigence d'"explications mécaniques complètes" du "lecteur français", et la critique qui s'ensuit, de l'application par Maxwell des équations de Lagrange à l'étude des interactions dans un système de courants électriques. Poincaré fait appel à cette même formulation Lagrangienne pour prouver que l'exigence du "lecteur français" ne pouvait pas être satisfaite: si l'on peut concevoir une explication mécanique complète d'un phénomène, une infinité d'autres est également en mesure de rendre compte des lois observées. Nous avons soutenu que cette critique a eu comme conséquence de valoriser la démarche de Maxwell qui, d'après Poincaré, visait non pas à fournir une explication mécanique complète des phénomènes électromagnétiques, mais uniquement à prouver que cette explication était possible. La spécification du mécanisme sous-jacent aux phénomènes est laissée de côté puisqu'elle ne peut pas, selon Poincaré, conduire à une solution unique et donc, ne doit pas concerner le physicien. Nous avons, néanmoins, souligné que Poincaré attribue une grande importance à la preuve de la possibilité d'une explication mécanique des phénomènes électromagnétiques. Cela montre, à notre avis, la place privilégiée qu'il accordait aux principes de la Mécanique et à son formalisme dans l'édifice de la Physique.

La critique de Duhem est plus radicale que celle de Poincaré. Il rejette même l'intérêt de la "méthode analytique" qui vise, selon lui, l'objectif — qu'il considère trop contraignant et illégitime — de donner une explication mécanique des phénomènes physiques. L'objet de la théorie physique n'est pas, selon Duhem, de donner une explication des lois physiques, mais uniquement de les classer. Les théories de Maxwell sont considérées comme des exemples de la poursuite de l'idéal que Duhem critique.

Nous avons souligné que ces réflexions, chez Duhem et Poincaré, sont accompagnées d'une critique du rôle de l'expérience dans la corroboration ou l'infirmité des hypothèses de la théorie physique.

De même que dans la discussion sur l'"objet" de la théorie physique, les analyses des deux savants français sur la "structure" de celle-ci ont une place centrale dans leurs épistémologies et encore une fois l'oeuvre de Maxwell est au centre de cette réflexion.

Poincaré assignait à la théorie physique une valeur instrumentale ou heuristique: ouvrir des nouvelles voies de recherche, suggérer des expériences, prévoir des nouveaux "faits", etc.. Pour ces raisons il attachait aux théories de Maxwell une grande importance, malgré sa preuve — dans Electricité et Optique — de l'existence dans le Treatise de théories incompatibles entre elles.

Pour Duhem, l'incohérence relevée par Poincaré doit conduire au rejet pur et simple des théories du savant écossais. Puisque la théorie physique n'est pas censée avoir de valeur heuristique, son objet étant uniquement de classer les lois physiques, sa structure doit présenter une logique irréprochable. Nous avons montré comment les diverses critiques "scientifiques" des théories de Maxwell chez Duhem étaient marquées par les exigences de son épistémologie au sujet de la structure des théories physiques. Ces exigences s'enracinent profondément dans son idée du développement de la physique mathématique comme un perfectionnement graduel de l'ordre logique" des théories, tendant à refléter de mieux en mieux un "ordre ontologique".

La réception en France des théories de Maxwell en électrici-

té et en magnétisme ne peut donc pas être comprise sans faire appel aux choix méthodologiques de la communauté scientifique française de la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. L'adoption de ces théories a eu sûrement un impact à ce niveau, comme le révèle la réflexion épistémologique de Poincaré. Le rejet des théories de Maxwell a tout aussi bien nourri la réflexion épistémologique de P. Duhem.

Nous avons montré comment ces réflexions, qui présentaient des différences essentielles à côté de leurs points de concordance, se sont traduites par des méthodologies distinctes et une divergence des trajectoires scientifiques empruntées par ces deux savants.

L'histoire de la réception en France des théories de Maxwell en électricité et en magnétisme fait apparaître les éléments d'un univers conceptuel qui va rentrer en crise dans le tournant du siècle. La réflexion épistémologique menée par Poincaré et par Duhem est, à notre avis, un symptôme de cette crise.

La nature et l'importance de l'"impulsion" communiquée par l'oeuvre de Maxwell au développement de la Physique ne peuvent être saisies qu'en discernant les bouleversements qu'elle a entraînés dans les diverses dimensions de la pensée scientifique du XIX<sup>ème</sup> siècle.

## APPENDICE A

POLARISATION DIELECTRIQUE ET THEORIES DE LA  
TRANSMISSION DE L'ACTION ELECTROSTATIQUE

L'Induction Electrostatique chez Faraday

La découverte en 1837 par Faraday, de l'existence d'une capacité inductive spécifique à chaque corps isolant, a ébranlé l'imposant édifice de l'électrostatique, développé depuis Coulomb par Poisson, Laplace, Green et d'autres. Dans cette électrostatique les corps isolants jouaient un rôle uniquement passif, en retenant le (ou les) fluide électrique dans les corps conducteurs, où il pouvait s'écouler librement.

L'importance de cette découverte, rapportée par Faraday dans la onzième série de ses Experimental Researches on Electricity, ne se mesure pas seulement à l'importance du défi qu'elle lançait à l'électrostatique traditionnelle, mais surtout à une nouvelle approche des phénomènes électrostatiques qu'elle aidera à cautionner. Nous verrons, effectivement, que la découverte de Faraday a pu être assimilée par l'électrostatique traditionnelle moyennant certaines hypothèses.

Chez Faraday cette découverte se rattachait naturellement à des théories concurrentes de la transmission de l'action et du processus d'électrisation, théories qu'il croyait recevoir, ainsi, une confirmation expérimentale. Cette dimension que Faraday donnait à sa découverte sera, plus tard, à l'origine des théories de Maxwell en électricité et magnétisme. Il est donc important de donner un aperçu des principaux développements conceptuels de la onzième série des recherches de Faraday, consacrée à "l'induction électrostatique".

L'origine de l'idée d'une polarisation moléculaire associée à l'induction électrostatique chez Faraday est, d'après les historiens, le concept d'état électrotonique qu'il avait introduit dans ses recherches en électromagnétisme. Lors de sa sensationnelle découverte, en 1831, de l'induction électromagnétique, en utilisant deux bobines enroulées dans un seul anneau métallique, Faraday a formulé l'hypothèse d'un "état de tension" dans les particules de l'anneau", qu'il appelle "état électrotonique". Les variations de cet "état" seraient responsables de l'induction des courants électriques dans la bobine. Il le concevait comme une polarisation où "la molécule acquiert des pouvoirs opposés dans ses différentes parties".<sup>1</sup>

Faraday a fini par abandonner cette hypothèse d'un état électrotonique pour expliquer l'induction électromagnétique, mais elle sera réintroduite, plus tard, dans ses recherches sur l'électrolyse, et toujours associée à une polarisation moléculaire.

Dans la onzième série de ses recherches, cette idée est appliquée à l'induction électrostatique :

"As, therefore, in the electrolytic action, INDUCTION appeared to be the FIRST step, and DECOMPOSITION the second(...); as the induction was the same in its nature as that through air, glass, wax, & c. produced by any of the ordinary means; and as the whole effect in the electrolyte appeared to be an action of the particles thrown into a peculiar or polarized state, I was led to suspect that common induction itself was in all cases an ACTION OF CONTIGUOUS PARTICLES, and that electrical action at a distance (i. e. ordinary inductive action) never occurred except through the influence of the intervening matter".<sup>2</sup>

Nous voyons donc Faraday, en faisant appel à une supposée analogie entre la décomposition électrolytique et les processus engendrés par l'induction électrostatique, ouvrir chemin vers un rejet de l'action à distance.

William soutient que ce rejet était un leitmotif théorique chez Faraday bien avant les recherches dont on s'occupe ici :

"... the most important part of his theoretical vision from 1832 onwards was his conviction that the transmission of force was an intermolecular process and not action at a distance".<sup>3</sup>

La onzième série de recherches est, en tout cas, orientée dans le sens de la découverte de phénomènes incompatibles avec la théorie de l'action à distance et prévisibles dans le cadre de sa nouvelle théorie.<sup>4</sup>

Ainsi, Faraday cherche à montrer que l'induction électrostatique se fait en "lignes courbes", ce qui serait, d'après lui,

"... utterly incompatible with action at a distance, as assumed by the received theories, which, according to every fact and analogy we are acquainted with, is always in straight lines".<sup>4</sup>

Il réalise alors une expérience dont les résultats, interprétés suivant la "vision moléculaire de l'induction", lui semblent concluants. Les molécules contigües mises dans un état de polarisation, interagissent mutuellement suivant la ligne courbe dans laquelle elles se disposent, et aussi latéralement. Nous voyons ici l'origine de la théorie des tensions et des pressions dans le milieu que Maxwell développera plus tard, ainsi que l'embryon de l'idée de "lignes de force" :

"... this induction is exerted in lines of force which, though in many experiments they may be straight; are here curved more or less according to circumstances. I use the term LINE OF INDUCTIVE FORCE merely as a temporary conventional mode of expressing the direction of the power in cases of induction (...) All this appears to me to prove that the whole action is one of contiguous particles, related to each other not merely in the lines which they may be conceived to form through the dielectric, between the INDUCTRIC and the INDUCTEUS surfaces, but in other lateral directions also. It is this which gives an effect equivalent to a lateral repulsion or expansion in the lines of force. I have spoken of, and enables induction to turn a corner. The power, instead of being like that of gravity,

which causes particles to act on each other through straight lines, whatever other particles may be between them, is more analogous to that of a series of magnetic needles, or to the condition of the particles considered as forming the whole of a straight or a curved magnet".<sup>5</sup>

Faraday est parfaitement conscient qu'il se place ici dans une perspective tout à fait nouvelle, par rapport à celle de Aepinus, Cavendish et Poisson, à laquelle il fait référence. L'action est transmise d'une façon contigüe, d'une molécule polarisée à la suivante, ce qui pour Faraday était en totale opposition à l'hypothèse d'une action à distance. Hare lui a reproché qu'il supposait en fait une action à distance entre les molécules polarisées contigües, qui ne se "touchent pas". Ces critiques ont été essentielles pour que Faraday reconsidère sa théorie, et pour qu'il attribue un statut ontologique aux "lignes de force". Dans la onzième série ces lignes sont encore utilisées dans un "sens général", pour indiquer la disposition des molécules polarisées, celles-ci ayant une réalité aux yeux de Faraday. Plus tard ces molécules vont disparaître et l'espace sera rempli par les lignes de forces, indissociables de la matière elle-même, conçue comme le lieu des "centres de force".<sup>6</sup>

La nouveauté de la onzième série de recherches ne se limite pas uniquement à une théorie alternative de la transmission de l'action. Faraday y développe aussi des conceptions originales sur la nature de l'électrisation. Dans une série d'expériences où il essaie, sans succès, de donner une charge absolue à la matière (c'est à dire, soit uniquement positive, soit négative) il suggère que l'électricité ne serait qu'un "pouvoir de la matière" et n'aurait pas une "existence réelle ou indépendante comme un fluide ou des fluides"; comme supposait l'électrostatique traditionnelle. Faraday a été cependant très prudent, et n'a pas voulu tirer des conséquences concernant la nature de l'électricité. Néanmoins, il lui semblait concluant que l'induction était un processus toujours associé à l'électrisation :

"The principle of induction is of the utmost generality in electric action. It constitutes charge in every ordinary case, it appears to be the cause of all excitement, and to precede every current".<sup>7</sup>

C'est dans ce cadre qu'il introduit le terme "diélectrique" pour souligner le rôle actif des corps isolants dans les phénomènes électrostatiques.

Un troisième développement dans la onzième série des recherches de Faraday concerne justement sa découverte d'une capacité inductive spécifique des diélectriques. Il a présenté d'abord cette découverte comme une conséquence de sa théorie de l'induction électrostatique :

"... if induction be an action of contiguous particles, and also the first step in the process of electrolyzation, there seemed reason to expect some particular relation of it to the different kinds of matter through which it would be exerted, or something equivalent to a SPECIFIC ELECTRIC INDUCTION for different bodies, which, if it existed, would unequivocally prove the dependence of induction on the particles; and though this, in the theory of Poisson and others, has never been supposed to be the case, I was soon led to doubt the received opinion, and have taken great pains in subjecting this point to close experimental examination".<sup>8</sup>

Faraday a interprété cette découverte comme une confirmation de sa théorie d'une action électrique transmise de façon contigüe et qui a donné naissance à une nouvelle approche de l'électrostatique. Toutefois, il faudra attendre W. Thomson et Maxwell pour qu'elle reçoive un habillage mathématique.

### La Théorie des Milieux Diélectriques de Mossotti

Mossotti a pris connaissance des recherches de Faraday sur les diélectriques dans les années 40, et a entrepris de construire une théorie mathématique des phénomènes observés par le savant anglais. Le rapport entre la théorie de Mossotti et les conceptions de Faraday est complexe, puisque les deux savants, tout en accordant un grand intérêt à la recherche de l'autre, avaient des conceptions radicalement différentes sur les constituants ultimes de la réalité. Le titre du mémoire de Mossotti publié en 1847, "Recherches théoriques sur l'induction électrostatique, envisagée d'après les idées de Faraday", peut, en fait, tromper. S'il est vrai que Mossotti épouse la conception de Faraday d'une transmission contigüe de l'action, il est tout aussi vrai que son modèle de la constitution des diélectriques, ou il suppose des molécules entourées par une "atmosphère éthérée", est étranger aux conceptions de Faraday et plutôt tributaire de la tradition continentale représentée par Ampère et Poisson. Faraday n'a en fait jamais accepté l'idée d'un éther, et cela a été un des principaux points de désaccord avec Ampère et sa théorie de la molécule électrodynamique.<sup>9</sup> En plus, les forces supposées par Mossotti entre les particules de matière et de l'éther se trouvent bien leur place dans la tradition continentale qui étudiait l'interaction entre les particules de plusieurs fluides.<sup>10</sup> Finalement, le formalisme élaboré par Mossotti n'est que la transposition, au cas des diélectriques, de la théorie du magnétisme induit de Poisson,<sup>11</sup> dont Mossotti cite de larges extraits dans son mémoire de 1850.<sup>12</sup>

Mossotti résume ainsi sa démarche et les hypothèses admises :

"Pour exprimer en termes analytiques l'action polaire des molécules du corps diélectriques, je me suis servi de l'analyse que Poisson a employée pour traiter la théorie du magnétisme suivant l'hypothèse de Coulomb, laquelle a une parfaite analogie avec celle d'une induction moléculaire électrique. Une légère réflexion suffit, en effet, pour faire concevoir que l'action résultante des éléments magnétiques d'un aimant dans lequel chaque élément déploie à un pôle une force australe, et à l'autre pôle une force boréale opposée, doit être semblable à celle d'une molécule du corps diélectrique dont l'atmosphère éthérée, condensée à une extrémité, déploie une force électrique positive, et, raréfiée à l'extrémité opposée, laisse à découvert une force électrique négative".<sup>13</sup>

La polarisation moléculaire supposée par Faraday est donc expliquée, dans la théorie de Mossotti, par l'hypothèse de l'existence d'une atmosphère éthérée qui peut se déplacer par rapport à la molécule du diélectrique à laquelle elle est attachée. Ce déplacement a une limite, contrairement aux fluides magnétiques de Aepinus, qui pouvaient se déplacer

tout au long de l'aimant. Coulomb a introduit l'idée que ce déplacement était circonscrit à chaque molécule du milieu. La notion "d'élément magnétique" que Poisson utilise, est dépendante de cette hypothèse de Coulomb.<sup>14</sup> Mossotti emprunte ainsi à Poisson cette même idée, qu'il applique aux diélectriques.

Nous nous sommes permis de citer plus longuement Mossotti, dans une illustration de sa théorie des diélectriques :

"Pour acquérir une idée de la teneur de ces théorèmes, qu'on s'imagine une grande enceinte formée par des parois de matière conductrice, communiquant avec le sol, et dans l'intérieur de laquelle sont distribués d'une manière quelconque des corps conducteurs isolés, qui sont électrisés en tout ou en partie. Dans cet état de choses, toutes les molécules qui composent le volume de l'air ambiant se polariseront électriquement, et l'on démontre que l'effet résultant de cet état de polarisation de toutes ces molécules est semblable à ce qui se passerait s'il venait à se créer, autour des surfaces des corps conducteurs, des couches électriques qui posséderaient les propriétés suivantes : 1° - La somme des électricités libres qui devraient composer ces couches est nulle, c'est-à-dire, l'électricité à fournir aux couches en excès serait égale à celle à en soutirer pour former les couches en défaut. 2° - Ces couches, qui représenteraient, aux limites du corps diélectrique, les effets non neutralisés des deux systèmes réciproques de forces intérieures, exercent, sur la surface des corps conducteurs environnants, des actions équivalentes à celles que les couches électriques propres de ces mêmes corps exerceraient si elles agissaient directement entre elles sans l'intervention du corps diélectrique".

Mossotti finit par se rallier aux conceptions de Faraday sur la transmission de l'action :

"Le corps diélectrique, par le moyen de la polarisation des atmosphères de ses molécules, ne fait que transmettre de l'un à l'autre corps l'action entre les corps conducteurs, neutralisant l'action électrique sur l'un et transportant sur l'autre une action égale que le premier aurait exercée directement".<sup>15</sup>

Malgré cette adhésion explicite de Mossotti au point de vue de Faraday, nous ne pouvons cependant pas voir cette conception comme une conséquence de la théorie qu'il a développée. En fait la théorie de Mossotti a représenté une réussite de l'électrostatique traditionnelle, qui a vu ainsi rentrer dans ses schémas conceptuels et analytiques la découverte de Faraday du rôle actif des diélectriques. Bertrand a remarqué cela d'une façon pertinente.<sup>16</sup> Nous verrons plus bas que W. Thomson a soutenu cette même position. Buchwald remarque que chez Faraday l'hypothèse d'une transmission contigüe de l'action était une "proposition élémentaire", tandis que chez Mossotti elle prétend être une conséquence théorique. En réalité - affirme-t-il - Mossotti, "showed that one could explain dielectric behavior with abandoning the scheme of central forces and subtle fluids as Faraday had".<sup>17</sup>

W. Thomson et les Théories de la Transmission de l'Action Electrostatique

Quand W. Thomson est venu pour la première fois à Paris en 30/01/1845, il a été sollicité pour donner son avis sur la théorie de l'action contigüe de Faraday, un thème qui était vraisemblablement au centre des débats à l'intérieur de la communauté scientifique française. Dans une lettre à son père datée de 30/03/45, W. Thomson reporte un rencontre qu'il a eu avec Liouville, où ce sujet a été abordé :

" Liouville asked me to write a short paper for the Institute, explaining the phenomena of ordinary electricity observed by Faraday, and supposed to be objections fatal to the mathematical theory. I told Liouville what I had always thought on the subject of those objections (i. e. that they are simple verifications), and as he takes a great interest in the subject he asked me to write a paper on it (...) Arago, it seems, has recently heard on Faraday's objections, and the uncertainty thus thrown on the theory prevented, as Liouville told me, its being made the subject for the mathematical prize of the Institute this year, and instead of it Abelian functions have been proposed. However, as Poisson before he died wished Liouville to do anything he could for it, I think it will very likely be proposed again".<sup>18</sup>

Il nous a été impossible de trouver d'autres évidences historiques concernant le caractère de ce débat, en France, autour des théories de la transmission de l'action. Nous croyons, néanmoins, que depuis les elucubrations d'Ampère sur le rôle de l'éther dans la transmission des actions électrodynamiques, il a eu en France des savants qui ont poursuivie dans cette même direction. Les travaux de Moutier et de Reynard, aussi bien que certaines déclarations de Lamé, bien que très postérieurs aux recherches d'Ampère, attestent de la vitalité et peut-être la continuité de ce type d'approche. Ces tentatives étaient sans doute marginales vis à vis des théories d'action à distance d'inspiration Laplacienne, comme celles de Poisson.

L'article demandé par Liouville à W. Thomson a été achevé peu de temps après son séjour à Paris, et publié dans le "Journal de Mathématiques" de Liouville pour l'année 1845.

Cet article présente un grand intérêt pour le sujet même de cet appendice aussi bien que pour une étude des origines de la pensée de Maxwell. Nous essayerons de rendre compte de son contenu, à partir de la version anglaise élargie, de la même année.<sup>19</sup>

W. Thomson montre dans ce mémoire que les expériences de Faraday et d'autres, ne constituent pas des objections aux résultats de Coulomb, mais sont, plutôt, des confirmations additionnelles de ces résultats. Après avoir rappelé les conceptions sur l'induction exposées par Faraday dans la onzième série de ses recherches, W. Thomson ajoute :

"As it is impossible that the phenomena observed by Faraday can be incompatible with the results of experiment which constitute Coulomb's theory, it is to be expected that the difference of his ideas from those of Coulomb must arise solely from a different method of stating and interpreting physically, the same laws; and further, it may, I think, be shown that either method of viewing the subject, when carried sufficiently far, may be made the foundation of a

mathematical theory which would lead to the elementary principles of the other as consequences. This theory would accordingly be the expression of the ultimate law of the phenomena, independently of any physical hypothesis we might, from other circumstances, be led to adopt".<sup>20</sup>

Dans un article publié en 1842, ayant comme titre "On the uniform motion of heat in homogeneous solid bodies, and its connexion with the mathematical theory of electricity", W. Thomson avait développé une analogie entre la théorie de la conduction de la chaleur de Fourier et les lois de l'électrostatique, de façon à traduire en langage mathématique les conceptions de Faraday sur les lignes de force.<sup>21</sup> Dans l'article que nous considérons ici, W. Thomson reprend cette analogie. La théorie mathématique qui en résulte peut, selon l'interprétation physique choisie, rendre compte aussi bien des résultats de Faraday que ceux de Coulomb. Les lois obtenues par analogie sont indépendantes — affirme W. Thomson — de toute hypothèse physique,

"... although the idea they naturally suggest is that of the propagation of some effect by means of the mutual action of contiguous particles; just as Coulomb, although his laws naturally suggest the idea of material particles attracting or repelling one another at a distance, most carefully avoids making this a PHYSICAL HYPOTHESIS, and confines himself to the consideration of the mechanical effects which he observes and their necessary consequences".<sup>22</sup>

Cette attitude "positiviste" a éveillé beaucoup de sympathie de la part de Duhem, qui cite des larges extraits de ce mémoire.<sup>23</sup>

En ce qui concerne le rôle des diélectriques découvert par Faraday, W. Thomson tâche de montrer qu'il est compatible avec la conception d'une action à distance, par la transposition de la théorie du magnétisme par influence de Poisson aux milieux diélectriques.

Il conclut l'article par des affirmations qui ne peuvent pas être plus nettes au sujet de la controverse sur les théories de l'action:

"The commonly received ideas of attraction and repulsion exercised at a distance, independently of any intervening medium, are quite consistent with all the phenomena of electrical action which have been here adduced. Thus we may consider the particles of air in the neighbourhood of electrified bodies to be entirely uninfluenced, and therefore to produce no effect in the resultant action on any point. It is, no doubt, possible that such forces at a distance may be discovered to be produced entirely by the action of contiguous particles of some intervening medium, and we have an analogy for this in the case of heat, where certain effects which follow the same laws are undoubtedly propagated from particle to particle. It might also be found that magnetic forces are propagated by means of a second medium, and the force of gravitation by means of a third. We know nothing, however, of the molecular action by which such effects could be produced, and in the present state of physical science it is necessary to admit the known facts in each theory as the foundation of the ultimate laws of action at a distance".<sup>24</sup>

W. Thomson adoptait donc, à l'époque une attitude de réserve vis-à-vis des hypothèses concernant le mode de transmission de la force. Une "théorie" était pour lui une "théorie mathématique", dans le sens de la théorie de Fourier de la propagation de la chaleur.<sup>25</sup>

Smith soutient qu'il y a eu un tournant dans les positions épistémologiques de W. Thomson, provoqué par la théorie dynamique de la chaleur de Joule.<sup>26</sup> Ce tournant se caractérise par l'introduction, dans les théories proposées par ce savant, d'une "troisième dimension" : celle des processus non-observables. Smith choisit comme repère la publication de la Théorie Dynamique de la Chaleur (1851), de W. Thomson.

Avant cette date - affirme Smith - il y avait de façon explicite chez Thomson, une distinction épistémologique entre une "théorie mathématique" - qui prendrait par objet d'étude les effets visibles, mécaniques - et des théories qui introduisent des hypothèses sur la nature physique et les causes des phénomènes. D'après cet auteur, W. Thomson, contrairement aux positivistes n'interdisait pas, à cette époque, ce deuxième type de théories mathématiques.

Nous avons vu que la mémoire de 1845 de W. Thomson est caractéristique de cette phase, où il évite d'adopter des hypothèses sur la nature de l'électricité et le mode de transmission de la force électrique. Smith met en évidence qu'il est tout aussi caractéristique de cette phase l'attitude sceptique de W. Thomson à l'égard de l'hypothèse d'Ampère des courants moléculaires pour expliquer la nature du magnétisme.

A cette époque W. Thomson était déjà à l'origine d'une nouvelle approche qui allait privilégier le concept d'énergie à la place de celui de la force. Ce dernier concept était considéré comme le fondamental chez Laplace dans le continent ou chez Robinson en Grande-Bretagne. W. Thomson voyait dans cette nouvelle approche un moyen d'éviter des hypothèses dans l'élaboration des théories physiques. Il aurait eu, à cet égard, une influence sur Rankine<sup>27</sup>. Dans cette place donc, W. Thomson - affirme Smith - "... was of course very close to the method of Newton's Principia and to Fourier's Théorie Analytique de la Chaleur where the emphasis was on the establishment of mathematical laws of the phenomena".<sup>28</sup>

A partir des années 50 W. Thomson introduira une différence entre la "dynamique physique", et il va alors incorporer dans cette dernière l'étude des processus non-observables. Ce principe de la dissipation de l'énergie (principe de Carnot) et le principe de la conservation de l'énergie vont permettre le passage d'une dynamique abstraite, réversible, à une dynamique physique qui prend en considération l'irréversibilité dans la nature. Par ce biais W. Thomson s'est engagé dans l'étude des phénomènes non-observables.<sup>29</sup>

Ce tournant épistémologique chez W. Thomson va s'affirmer de plus en plus, et marquera ses recherches dans tous les domaines. Nous voulons ajouter aux remarques de Smith, les tentatives de W. Thomson de proposer des modèles pour l'éther et de fournir une base mécanique à l'Optique, à l'Electricité et au magnétisme. Nous croyons que cette approche est tout aussi caractéristique de la consolidation d'une nouvelle épistémologie chez le savant écossais.

Sur cette base W. Thomson va manifester plus tard une résistance à la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell. Cette théorie ne répondait effectivement pas aux exigences de W. Thomson concernant une explication mécanique de tous les phénomènes physiques.

## APPENDICE B

LA TRADITION CONTINENTALE EN ELECTRODYNAMIQUE

La réception de l'électrodynamique de Maxwell sur le continent européen s'est faite dans un contexte d'adhésion massive de la communauté scientifique continentale à un programme concurrent très développé, ayant par origine immédiate les recherches d'Ampère.

Maxwell dans le Treatise caractérise ces deux programmes rivaux par l'opposition entre les approches d'action à distance et d'action contigüe. Il oppose particulièrement les "méthodes" d'Ampère et de Faraday :

"The ideas which guided Ampère belong to the system which admits direct action at a distance, and we shall find that a remarkable course of speculation and investigation founded on those ideas has been carried on by Gauss, Weber, F. E. Neumann, Riemann, Betti, C. Neumann, Lorenz, and others, with very remarkable results both in the discovery of new facts and in the formation of a theory of electricity".

"The ideas which I have attempted to follow out are those of action through a medium from one portion to the contiguous portion. These ideas were much employed by Faraday, and the development of them in a mathematical form, and the comparison of the results with known facts, have been my aim in several published papers. The comparison, from a philosophical point of view, of the results of two methods so completely opposed in their first principles must lead to valuable data for the study of the conditions of scientific speculation.<sup>30</sup>

Dans son Treatise Maxwell fait référence à la résistance à admettre l'approche d'action contigüe. Son interprétation de cette attitude mérite une attention particulière puisqu'elle touche le sujet central de ce travail.

D'après Maxwell il y a eu un "prejugé" à l'égard de sa méthode et de celle de Faraday, de la part de ceux qui adhéraient au point de vue selon lequel les actions électrique et magnétique agissent à distance. La résistance en particulier à l'idée d'un milieu électromagnétique qui servirait de relais à la transmission de l'action reflétait, d'après lui, une réaction "rationaliste" à la prolifération des fluides étherés dans l'explication des phénomènes physiques. Cette réaction a conduit à l'adoption non seulement des résultats de la mécanique Newtonienne (et son extrapolation à d'autres domaines de la physique), mais aussi du "dogme" méthodologique de Cotes, à savoir,

"... that action at a distance is one of the primary properties of matter, and that no explanation can be more intelligible than this fact".<sup>31</sup>

Cependant, quand on regarde de plus près l'état de la recherche en électricité et magnétisme à l'époque de Maxwell on se rend compte que l'opposition entre les approches d'action à distance et d'action contigüe --

qui a sans doute joué un rôle fondamental dans la réception des théories de Maxwell — elle n'explique pas complètement l'attitude de la communauté scientifique continentale.

Une première donnée historique incontournable est la puissance de l'approche continental en électrodynamique qui avait réussi — dans un effort théorique collectif allant d'Ampère (dans les années 20) à Helmholtz (dans les années 70) — à rendre compte des phénomènes connus.

Helmholtz, dans son électrodynamique de 1870, a intégré, dans un tour de force théorique, les principaux résultats de la théorie de Maxwell qui supposaient le rôle du vide dans les actions électrodynamiques. Helmholtz a réussi, en particulier, à prévoir la propagation d'actions électromagnétiques dans le vide, résultat qui jusqu'alors distinguait la théorie de Maxwell de celles du "continent". Poincaré, dans son cours à la Sorbonne de 1890/1, a exposé les théories de Maxwell et de Helmholtz côte à côte, dans une tentative de cerner leurs traits distinctifs, et décider en faveur d'une de ces deux approches de l'électromagnétisme. Duhem a plaidé, aussi tard que 1913, en faveur de la "tradition" continentale représentée par la théorie de Helmholtz.

En ce qui concerne une théorie de la lumière ayant une base électromagnétique — ce que Maxwell a proposé dès 1862 — Lorenz et Riemann avaient fait des efforts théoriques importants dans ce sens, à l'intérieur du "programme" continental. Il convient aussi de signaler que les théories éther-élastiques de la lumière se sont succédées au moins jusqu'aux années 80.

Le contexte dans lequel les théories de Maxwell ont été reçues était donc beaucoup plus complexe qu'il ne ressort des thèses historiographiques du Treatise.

Il nous semble donc essentiel, pour comprendre les enjeux dans la réception des théories de Maxwell, d'analyser dans ses traits essentiels l'évolution des théories continentales en électricité et magnétisme au XIX<sup>e</sup> siècle.

#### LES LOIS DE L'ACTION ELECTRODYNAMIQUE D'AMPERE ET DE WEBER

Les semaines qui ont suivi la communication à l'Académie des Sciences de la découverte d'Oersted de l'effet sur une aiguille magnétique du passage d'un courant électrique, ont été d'intense activité pour Ampère. Dans une série de communications qu'il présente alors à l'Académie, il fonde la science de l'électrodynamique.

Ampère annonce dans la première de ces communications la découverte d'une action mécanique entre des courants électriques, ce qui l'a fait reconnaître, dans l'histoire de la physique, comme le père de cette nouvelle science.

Ampère essaie, après cette découverte, de ramener d'autres phénomènes (l'action mutuelle entre un courant électrique et le globe terrestre ou un aimant; l'action mutuelle entre deux aimants) à cette action élémentaire, moyennant l'hypothèse que la cause du magnétisme serait liée aux courants électriques supposés exister à l'intérieur des aimants ou du globe terrestre.

L'action mécanique entre deux conducteurs parcourus par des courants électriques pouvait être traitée par le calcul — affirmait Ampère — si l'on partait d'une action entre des éléments infinitésimaux de ces courants :

"Dès mes premières recherches sur le sujet dont nous nous occupons, j'avais cherché à trouver la loi suivant laquelle varie l'action attractive ou répulsive de deux courants électriques, lorsque leur distance et les angles qui déterminent leur position respective changent de valeurs. Je fus bientôt convaincu qu'on ne pouvait conclure cette loi d'expériences directes parce qu'elle ne peut avoir une expression simple qu'en considérant des portions de courants d'une longueur infiniment petite, et qu'on ne peut faire d'expérience sur de tels courants, l'action de ceux dont on peut mesurer les effets est la somme des actions infiniment petites de leurs éléments ..." 32

En adoptant l'hypothèse relative aux courants électriques à l'intérieur des aimants, Ampère a montré que la "loi" de l'action entre des éléments de courants pouvait aussi rendre compte des interactions électromagnétiques. Il réussit de cette façon à assimiler l'électromagnétisme à l'intérieur de l'électrodynamique.....

Dans une communication lue à l'Académie en juin 1822, Ampère propose une "formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs voltaïques". A partir d'un travail expérimental sur des situations d'équilibre entre conducteurs parcourus par des courants électriques, Ampère "déduit" sa loi de la force entre deux de ces éléments :

$$F = \frac{ii' ds ds'}{r^2} \left[ \sin \theta \cdot \sin \theta' \cdot \cos \omega - \frac{1}{2} \cos \theta \cdot \cos \theta' \right] \quad (1)$$

ou  $\theta$  et  $\theta'$  sont les angles formés par les éléments  $ds$  et  $ds'$  avec la droite qui les joint;  $\omega$  est l'angle entre les plans qui contiennent cette droite et chacun des éléments, respectivement. 33

Cette force est dirigée selon la droite qui joint les deux éléments et Ampère, dans son mémoire de 1826, la considérait alors comme compatible avec les préceptes Newtoniens concernant les forces de la nature. Sa méthodologie de "déduire des lois indépendamment de toute hypothèse sur la nature des forces", suivait aussi la méthodologie du grand savant anglais. 34

Cependant, la loi d'Ampère n'est pas directement testable — comme lui même en avait conscience — et donc elle peut difficilement être considérée comme "déduite" de l'expérience sans faire appel à des hypothèses. L'expérience à l'époque ne pouvait donner des renseignements que sur l'action entre portions finies de courants fermés. D'autres lois de la force entre éléments de courants sont tout aussi compatibles avec ces données expérimentales. La théorie du magnétisme d'Ampère est, elle aussi, loin d'être indépendante d'hypothèses, et se heurtait à l'orthodoxie Laplacienne, fidèle à l'idée de Coulomb selon laquelle le magnétisme et l'électricité étaient des phénomènes irréductibles.

Ampère acceptait en fait la théorie des deux fluides électriques, mais la base "ontologique" de sa loi d'action électrodynamique ne

comprennait pas les particules de ces fluides mais des "éléments de courant". Ampère attribuait à ces "éléments" une réalité physique, en plus de leur rôle "instrumental" pour les besoins du calcul.

La loi d'Ampère a été à l'origine des efforts théoriques continuentaux pour rendre compte des phénomènes électrodynamiques et électromagnétiques.

En 1846 Weber interprète l'action électrodynamique d'Ampère en terme de forces entre particules électriques, leur flux dans les conducteurs étant supposé constituer un courant électrique. Le but de Weber était d'unifier l'électrostatique et l'électrodynamique. Les hypothèses dues à son ami Fechner, concernant la nature des courants électriques, ont fourni le fondement de cette entreprise théorique:

"Fechner supposed every current to consist in a streaming of electric charges, equal to them in magnitude and number, travelling in the opposite direction with equal velocity. He further supposed that like charges attract each other when they are moving parallel to the same direction, while unlike charges attract when they are moving in opposite directions"<sup>35</sup>

Weber adopte cette hypothèse et suppose que la force entre des particules électriques en mouvement est centrale et donnée par l'expression :

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} \left[ r \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial r}{\partial t} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

A partir de l'expression de Weber de la force entre particules électriques, on peut déduire aussi bien les forces électrostatiques que les forces électrodynamiques d'Ampère. L'induction électromagnétique découverte par Faraday en 1831 découle aussi de cette expression.

Cependant, la dépendance de la vitesse et de l'accélération des particules électriques présente dans l'expression de Weber a été l'objet de nombreuses critiques, notamment celle de Helmholtz. Celui-ci considérait que cette dépendance rendait la loi de forces incompatible avec le principe de conservation de l'énergie. C'était le point de départ d'une longue polémique entre les partisans de l'un et l'autre savant. Les disciples de Weber ont réussi pourtant à montrer qu'on peut dériver la loi de forces de Weber à partir d'un potentiel, ce qui prouve sa compatibilité avec le principe de conservation de l'énergie.

Pour certains historiens des sciences les critiques — finale — ment non fondées — de Helmholtz à l'égard de l'électrodynamique de Weber ont beaucoup joué en faveur de l'approche alternative de Maxwell. La théorie de Weber était effectivement la principale concurrente à l'époque où Maxwell a commencé à développer ses théories. Maxwell d'ailleurs fait allusion, dans tous ses mémoires, aux critiques de Helmholtz à l'électrodynamique de Weber.

Helmholtz lui-même n'a jamais pu accepter la loi de Weber en raison de la force y être fonction de la vitesse et de l'accélération des particules; et cela malgré le succès des disciples de Weber à contrer les objections qu'il avait soulevées. Une des motivations de l'électrodynamique de Helmholtz de 1870 a été le refus d'accepter une loi de forces ayant ce type de dépendance fonctionnelle (ce que lui paraissait inévitable).

D'autres lois de l'interaction entre particules électriques en mouvement ont été proposées par Gauss, Riemann et Clausius. Elles présentaient toutes, cependant, des difficultés mécaniques unsurmontables.

LE POTENTIEL DE NEUMANN ET L'ELECTRODYNAMIQUE  
DE HELMHOLTZ

Une autre approche théorique, qu'Helmholtz allait adopter plus tard, a été introduite par F. Neumann.

En 1845 il a proposé une théorie mathématique du phénomène d'induction électromagnétique, fondée sur une expression de l'énergie potentielle de deux éléments de courant :

$$A^2 \frac{i i' \cos \varepsilon}{r} ds ds' \quad (3)$$

ou  $\varepsilon$  est l'angle entre les éléments  $ds$  et  $ds'$ ,  $A^2$  une constante qui dépend des unités de courant,  $r$  la distance entre les éléments,  $i$  et  $i'$  les courants respectifs.

Le point de départ de la théorie de F. Neumann a été une règle proposée par Lenz dès 1834, concernant le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday.

A part sa réussite à rendre compte de l'effet de Faraday, l'expression de F. Neumann permet aussi de déduire la loi d'action électrodynamique d'Ampère.

Selon une appréciation de Maxwell, F. Neumann aurait réussi de cette façon à faire rentrer le phénomène d'induction magnétique dans le cadre du traitement mathématique de l'action électrodynamique dû à Ampère.<sup>36</sup>

Dans le sens où Neumann visait une expression qui devait nécessairement conduire à la loi d'Ampère, Maxwell a sans doute raison. Néanmoins, la théorie de Neumann est plutôt à l'origine d'une autre approche, qui considère le concept d'énergie comme primaire et celui de force comme secondaire. J.J. Thomson classe cette théorie, avec celles de Helmholtz et de Maxwell, parmi les "théories dynamiques" de l'électricité et du magnétisme, caractérisées par la place accordée au concept d'énergie.<sup>37</sup> Les théories d'Ampère et de Weber sont axées, par contre, sur une loi de la force.

Ainsi Helmholtz, en généralisant la construction théorique de Neumann, a voulu éviter les inconvénients de toute théorie qui suppose une force soit entre éléments, soit entre particules électriques.

Dans son mémoire "Ueber die Bewegungsgleichungen der Elektrizität für ruhende leitende Körper" de 1870, Helmholtz s'est proposé de généraliser l'expression de l'énergie potentielle de deux éléments de courant de façon à pouvoir englober les résultats des théories de F. Neumann, Weber et Maxwell. De cette façon il prétendait éviter les difficultés qu'il soulevait concernant la théorie de Weber et, d'un autre côté, assimiler la

théorie de Maxwell — avec son résultat fondamental concernant la propagation d'ondes électromagnétiques — à l'intérieur d'une approche traditionnelle des interactions électriques et magnétiques.

Avant tout nous voudrions rappeler que la théorie électrodynamique de Helmholtz est essentiellement fondée sur le concept d'énergie et le principe de sa conservation. Un des avantages qu'il en a pu tirer a été celui d'obtenir des résultats avec un minimum d'hypothèses. Son expression de l'énergie potentielle entre deux éléments de courants, que nous donnerons ci-dessus, est "phénoménologique" dans le sens qu'elle ne suppose pas, contrairement à la loi de Weber, des hypothèses sur la nature des courants électriques.

Déjà en 1847, dans son mémoire "WEBER DIE ERHALTUNG DER KRAFT", Helmholtz avait montré que le phénomène d'induction électromagnétique pouvait être prévu, en théorie, par l'adoption conjointe de l'action électrodynamique d'Ampère et du principe de conservation de l'énergie. W. Thomson a aussi donné cette démonstration d'une façon indépendante, la même année de publication du mémoire de Helmholtz.

Le fondement de l'électrodynamique de Helmholtz de 1870 est son expression de l'énergie potentielle de deux éléments de courant :

$$-\frac{1}{2} A^2 \frac{i j}{r} \left[ (1+K) \cos(\alpha, d\sigma) + (1-K) \cos(\alpha, ds) \cos(\alpha, d\sigma) \right] ds d\sigma \quad (4)$$

ou  $ds$ ,  $d\sigma$  sont les éléments, parcourus respectivement par des courants  $i$  et  $j$ ;  $r$  est la distance entre  $ds$  et  $d\sigma$ ;  $A$  est une constante qui dépend de l'unité de courant;  $K$  est un paramètre qui pourra prendre certaines valeurs, comme nous le verrons par la suite.

A partir de ce potentiel généralisé Helmholtz montre qu'on peut obtenir le potentiel de Neumann (eq. 3) en faisant  $K=1$ . Le potentiel associé à la force de Weber (eq. 2) est obtenu en faisant  $K=-1$ . Et finalement, les résultats de la théorie de Maxwell seraient obtenus en faisant  $K=0$  dans l'expression (4).

Le paramètre  $K$  restera donc indéterminé tout au long des développements de Helmholtz, et sa valeur n'affecte pas, pour des courants fermés, le calcul de leur action électrodynamique. Seulement des expériences sur des courants ouverts — signale Helmholtz — pourraient donc déterminer la valeur du paramètre  $K$  et décider entre les théories de F. Neumann, Weber et Maxwell.

Nous verrons que plus tard, ces considérations seront la toile de fond des analyses de Poincaré, Duhem et d'autres, concernant les rapports entre les théories de Maxwell et de Helmholtz, et de leur confrontation avec les évidences expérimentales disponibles.

Les forces entre éléments de courant prévues par l'expression (4) seront: d'une part une force comme celle d'Ampère dirigée selon la droite qui joint les éléments  $ds$  et  $d\sigma$ ; d'autre part, les angles qu'y figurent traduisent l'existence de couples appliqués aux extrémités des éléments. Les objections de Bertrand à la théorie de Helmholtz seront fondées sur un rejet de la réalité de ces couples, les seules forces admissibles pour lui devant nécessairement être dirigées selon la droite qui joint les éléments.

En adoptant un procédé dû à Kirchhoff, Helmholtz généralise au cas de conducteurs tridimensionnels l'interaction supposée par l'expression (4). Si  $u$ ,  $v$ ,  $w$  sont les composantes du courant électrique suivant les arêtes d'un élément de volume  $dx dy dz$ , l'énergie d'interaction entre cet élément et tous les autres repandus dans l'espace sera donné par :

$$-A^2 (Uu + Vv + Ww) dx dy dz, \quad (5)$$

où

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{1}{2} (1-k) \frac{d\psi}{dx} + \iiint \frac{u'}{r} d\xi d\eta d\zeta \\ V &= \frac{1}{2} (1-k) \frac{d\psi}{dy} + \iiint \frac{v'}{r} d\xi d\eta d\zeta \\ W &= \frac{1}{2} (1-k) \frac{d\psi}{dz} + \iiint \frac{w'}{r} d\xi d\eta d\zeta \end{aligned} \right\} (6)$$

et

$$\psi = \iiint \left( u' \frac{dx}{d\xi} + v' \frac{dx}{d\eta} + w' \frac{dx}{d\zeta} \right) d\xi d\eta d\zeta \quad (7)$$

$d\xi d\eta d\zeta$  désigne un autre élément de volume générique dans l'espace, parcouru par un courant dont les composants sont donnés par  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ .<sup>38</sup>

D'après le théorème de Green, on peut écrire (7) sous la forme :

$$\psi = - \iiint r \left( \frac{du'}{d\xi} + \frac{dv'}{d\eta} + \frac{dw'}{d\zeta} \right) d\xi d\eta d\zeta \quad (7')$$

Si  $\varphi$  désigne le potentiel électrostatique associé à une densité de volume  $E$  d'électricité libre, la condition de continuité pour les courants électriques sera<sup>39</sup> :

$$\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{d\Delta\varphi}{dt} = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \quad (8)$$

$$\text{où} \quad \varphi = \iiint \frac{E}{r} d\xi d\eta d\zeta$$

Nous pouvons donc transformer encore (7') :

$$\Psi = \int r \frac{dE}{dt} d\xi d\eta d\zeta \quad (7'')$$

Ces résultats nous permettent d'écrire <sup>40</sup> :

$$\Delta \Psi = 2 \frac{d\varphi}{dt} \quad .$$

Si nous appliquons l'opérateur  $\Delta$  des deux cotés des eqs. (6), il vient :

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= (1 - \kappa) \frac{d^2 \varphi}{dx dt} - 4\pi u \\ \Delta V &= (1 - \kappa) \frac{d^2 \varphi}{dy dt} - 4\pi v \\ \Delta W &= (1 - \kappa) \frac{d^2 \varphi}{dz dt} - 4\pi w \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Nous pouvons aussi écrire que :

$$\frac{dU}{dx} + \frac{dV}{dy} + \frac{dW}{dz} = -\kappa \frac{d\varphi}{dt} \quad (10)$$

Les forces électromotrices d'induction seront données par :

$$-A^2 \frac{dU}{dt} ; -A^2 \frac{dV}{dt} ; -A^2 \frac{dW}{dt} \quad (11)$$

Dans la théorie qu'on vient d'exposer dans ses traits généraux; les diélectriques ne jouent aucun rôle. A partir de la section 8 de son mémoire, Helmholtz introduit l'idée d'un milieu passible de polarisation électrique et magnétique. La polarisation des diélectriques serait l'effet d'une action à distance des forces électrostatiques, électromagnétiques et magnétiques. Celle-ci sera la grande originalité de l'électrodynamique

de Helmholtz par rapport aux théories proposées jusqu'alors sur le continent. L'introduction de cette hypothèse avait explicitement pour but, d'arriver à des résultats semblables à ceux obtenus par Maxwell concernant une propagation d'ondulations électromagnétiques dans les milieux diélectriques. Helmholtz voyait ce résultat de sa théorie comme un nouveau cas d'analogie entre la propagation d'effets électromagnétiques et les ondulations lumineuses.

#### LA NOTION DE POLARISATION ELECTRIQUE CHEZ HELMHOLTZ

Helmholtz suppose, au début de la section 8, que l'action à distance de "forces externes" ( $X, Y, Z$ ), et de la distribution d'électricité peut engendrer un moment électrique dans le milieu, définit par :

$$\gamma = \epsilon \left( X - \frac{d\varphi}{dx} \right), \text{ etc.} \quad (12)$$

où  $\epsilon$  est la constante de polarisation diélectrique, et  $\varphi$  est le potentiel associé à la distribution d'électricité. Ce potentiel est défini d'avantage par l'équation :

$$-\frac{d\gamma}{dx} - \frac{d\eta}{dy} - \frac{d\zeta}{dz} = -\frac{1}{4\pi} \Delta \varphi \quad , \quad (13)$$

où  $(\gamma, \eta, \zeta)$  sont les composantes du moment diélectrique. Les forces "externes",  $X, Y, Z$ , dérivent d'un potentiel  $\psi$  :

$$X = -\frac{d\psi}{dx} \quad , \quad \text{etc.} \quad (14)$$

associé à une densité solide  $E$  d'électricité :

$$E = -\frac{1}{4\pi} \Delta \psi \quad (15)$$

Si nous éliminons les composantes  $(\gamma, \eta, \zeta)$  à l'aide de ces équations il vient :

$$-\frac{1}{4\pi} \Delta (\psi + \varphi) = \frac{1}{1+4\pi\epsilon} E \quad , \quad (16)$$

où il est supposé que  $E$  est constante dans tout le milieu.

Helmholtz interprète ensuite les conséquences de l'éq. (16) pour l'électrostatique. Les effets de la présence d'une quantité  $E$  d'électricité dans un milieu diélectrique sont identiques à ceux d'une quantité

$E / (1+4\pi\epsilon)$  d'électricité dans un milieu non diélectrique. Ce résultat peut être traduit autrement, en disant que dans un milieu diélectrique la quantité  $E$  d'électricité est neutralisée par une quantité

$-4\pi\epsilon E / (1+4\pi\epsilon)$  d'électricité. En conséquence le potentiel associé à une masse  $E_1$  d'électricité dans un milieu diélectrique sera :

$$\frac{E_1}{(1+4\pi\epsilon) r} \quad (17)$$

et la force Coulombienne de répulsion entre deux masses  $E$  et  $E_1$  sera :

$$\frac{E \cdot E_1}{(1 + 4\pi\epsilon) r^2} \quad (18)$$

La mesure électrostatique des masses  $E$  et  $E_1$  dans un milieu diélectrique est donc diminuée par un facteur  $\sqrt{1 + 4\pi\epsilon}$ .

Helmholtz va plus loin dans la spécification de la nature de ce moment électrique, de façon à pouvoir introduire la notion fondamentale d'un courant de polarisation. Il considère un élément de volume  $dS$  du milieu où une quantité  $E$  d'électricité positive est transportée dans la direction positive de l'axe "x", d'une distance  $\frac{1}{2} s$ , et une quantité  $E$

d'électricité négative est transportée de la même distance dans la direction contraire. Le résultat sera l'établissement d'un moment électrique dans cet élément donné par :

$$\mathcal{P} = E \cdot s \quad (19)$$

Ces transports d'électricité à l'intérieur de l'élément  $dS$  sont équivalents à un courant  $\mu_0$  :

$$\mu_0 dt = E \cdot s \quad (20)$$

Ce courant peut donc être exprimé en termes de moment électrique par :

$$\mu_0 = \frac{d\mathcal{P}}{dt}, \text{ etc.} \quad (21)$$

Ce courant doit être ajouté, selon Helmholtz, au courant ( $\mu_2, v_2, w_2$ ) qui a lieu dans les corps conducteurs.

Ce dernier obéit à la loi d'Ohm :

$$\chi \mu_2 = \frac{1}{\epsilon} \mathcal{P}, \text{ etc.} \quad (22)$$

où  $\chi$  est la résistance du conducteur. Le membre droit de cette dernière équation donne la force électromotrice totale obtenue à partir de l'éq. (12)

Le courant total sera donc la somme des deux types de courants donnés par (21) et (22) :

$$\mu = \frac{d\mathcal{P}}{dt} + \frac{1}{\epsilon \chi} \mathcal{P}, \text{ etc.} \quad (23)$$

Avec cette nouvelle interprétation des grandeurs ( $u, v, w$ ), Helmholtz affirme que l'équation (8) reste valable.

Si  $E$  désigne l'électricité libre, on a finalement :

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \quad (24)$$

LA POLARISATION MAGNETIQUE DU MILIEU

A part la polarisation électrique qu'on vient de considérer, Helmholtz suppose aussi que le milieu est passible d'une polarisation magnétique dont les composantes sont  $(\lambda, \mu, \nu)$ . Par analogie avec les équations (12), il écrit :

$$\lambda = \mathcal{V} \left[ \mathcal{L} - \frac{dX}{dx} \right], \text{ etc.} \quad (25)$$

où  $X$  est la fonction potentiel magnétique,  $(\mathcal{L}, \mathcal{M}, \mathcal{N})$  les composantes de la force magnétique externe et  $\mathcal{V}$  la constante de polarisation magnétique. On peut écrire, d'une façon semblable aux développements concernant la polarisation diélectrique que :

$$\frac{d\lambda}{dx} + \frac{d\mu}{dy} + \frac{d\nu}{dz} = \frac{1}{4\pi} \Delta X \quad (26)$$

La force magnétique  $(\mathcal{L}, \mathcal{M}, \mathcal{N})$  est liée aux courants  $(u, v, w)$  à travers les fonctions  $(U, V, W)$  données par les eqs. (6) :

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L} &= A \left( \frac{dV}{dz} - \frac{dW}{dy} \right) \\ \mathcal{M} &= A \left( \frac{dW}{dx} - \frac{dU}{dz} \right) \\ \mathcal{N} &= A \left( \frac{dU}{dy} - \frac{dV}{dx} \right) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Si on définit des grandeurs  $(L, M, N)$  par les équations :

$$L = \iiint \frac{\lambda}{r} d\xi d\eta d\zeta, \text{ etc.} \quad (28)$$

la force électromotrice due à la variation de la polarisation magnétique sera :

$$A \frac{d}{dt} \left( \frac{dN}{dy} - \frac{dM}{dz} \right), \text{ etc.} \quad (29)$$

Cette force doit être ajoutée aux forces électromotrices d'origine électrostatique, électromagnétique et autres, qui, par une action à distance, causent la polarisation électrique :

$$\frac{1}{\epsilon} \mathcal{E} = - \frac{d\varphi}{dx} - A^2 \frac{dU}{dt} + A \frac{d}{dt} \left( \frac{dN}{dy} - \frac{dM}{dz} \right) + \mathcal{X}, \text{ etc.} \quad (30)$$

où  $\mathcal{X}$  désigne les forces électromotrices d'origine autre (thermoélectrique, etc.).

LA PROPAGATION D'ONDULATIONS ELECTROMAGNETIQUES DANS  
L'ELECTRODYNAMIQUE DE HELMHOLTZ DE 1870

A partir de cet ensemble d'équations Helmholtz déduit deux équations qui peuvent, d'une certaine manière, exprimer la propagation ou plutôt la diffusion dans le milieu d'ondes de polarisation électrique et magnétique. L'équation d'onde de la composante "x" de la polarisation électrique sera :

$$\Delta \varphi = 4\pi\varepsilon (1 + 4\pi\vartheta) A^2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \left[ 1 - \frac{(1 + 4\pi\vartheta)(1 + 4\pi\varepsilon)}{K} \right] \frac{d}{dx} \left( \frac{d\varphi}{dx} + \frac{d\eta}{dy} + \frac{d\zeta}{dz} \right) \quad (31)$$

L'équation d'onde de la composante "x" de la polarisation magnétique aura la forme :

$$\Delta \lambda = 4\pi\varepsilon (1 + 4\pi\vartheta) A^2 \frac{d^2 \lambda}{dt^2} \quad (32)$$

L'équation (31) a pour solutions<sup>42</sup> :

1 - Des ondes de polarisation électrique transversales, qui se propagent avec une vitesse :

$$\frac{1}{A \sqrt{4\pi\varepsilon (1 + 4\pi\vartheta)}} \quad (33)$$

2 - Des ondes de polarisation électrique longitudinales qui se propagent avec une vitesse :

$$\frac{1}{A} \sqrt{\frac{1 + 4\pi\varepsilon}{4\pi\varepsilon K}} \quad (34)$$

L'équation (32) a comme solution des ondes de polarisation magnétique transversales qui se propagent avec la même vitesse que les ondes transversales de polarisation électrique, c'est à dire (33). Les ondes longitudinales de polarisation magnétique ont une vitesse infinie de propagation (la théorie ne prévoit donc pas l'existence de ces dernières).

Helmholtz compare alors sa théorie avec la théorie de Maxwell ~~en ce qui~~ concerne la propagation des ondulations électromagnétiques. Il montre que les résultats de Maxwell peuvent être obtenus en faisant  $k=0$ ,  $\varepsilon \rightarrow \infty$  et  $\vartheta \rightarrow \infty$ . Ces résultats seraient donc des "limites" de sa

propre théorie. Avec la condition  $K=0$ , l'onde longitudinale disparaît, comme exige la théorie de Maxwell. Poincaré établit d'autres conditions pour le "passage" de la théorie de Helmholtz à la théorie de Maxwell.

Helmholtz conclut alors que la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell peut être considérée comme fournissant une simple analogie entre les "ondes" électromagnétiques et les ondes lumineuses, et que l'approche traditionnelle fondée sur l'action à distance peut fournir aussi une analogie semblable :

"The remarkable analogy between the motion of electricity in a dielectric and that of the luminiferous ether does not depend on the particular form of Maxwell's hypothesis, but follows in essentially the same way if we maintain the older viewpoint of electrical action at a distance."<sup>43</sup>

La signification physique de la théorie de Helmholtz est cependant, aussi à d'autres égards, très différente de celle de la théorie de Maxwell. Helmholtz avait déjà signalé dans son article, que toute théorie des diélectriques basée sur la théorie de l'induction magnétique de Poisson, aboutit à une polarisation qui affaiblit seulement, l'action à distance de la distribution d'électricité libre, tandis que chez Maxwell la polarisation remplace complètement l'action à distance.<sup>44</sup>

Cependant, cette différence n'est pas la seule à être soulignée. La nature des "ondes" de polarisation prévues par la théorie de Helmholtz est très différente de celles prévues par la théorie de Maxwell. Wise exprime d'une façon très claire ce point. Il met en évidence que les eqs. (31) et (32) sont des descriptions qui ont une ressemblance, formelle uniquement, avec celles de la propagation de proche en proche des polarisations :

"The result, however, was only mathematical and not physical; it did not imply that polarisations actually propagated, but only that they spread in time. In each original elasticity equation (...) Helmholtz had replaced the summed forces of currents and polarisations, acting from all distances on a local region, by differentials of their effects ( polarisations ) in the local region. Spreading of polarisation, or the wave equation, arose from the replacement process as a coincidental result of the relation between spatial and temporal derivatives in the laws of electromagnetic action. No approximation were necessary, not even neglect of long-range actions over short-range ones."<sup>45</sup>

Cette différence n'était pas cependant très claire pour les contemporains de Helmholtz et de Maxwell. Il va falloir un long travail expérimental et théorique de Hertz pour établir cette distinction.

Et là nous touchons à l'importance historique fondamentale de l'électrodynamique de Helmholtz. Elle a stimulé — à travers le prix de l'Académie des Sciences de Berlin de 1879 — et guidé ( au moins dans ses débuts ) le travail expérimental de Hertz qui aboutira à la sensationnelle "découverte" de 1888.

Une autre signification historique de l'électrodynamique de Helmholtz concerne, d'une façon plus immédiate, les recherches historiques dont nous nous occupons dans le présent travail. Si la réception des théories de Maxwell en France n'a pas été biaisée — comme l'affirment quelques historiens de la physique du XIX<sup>e</sup> — par la théorie de Helmholtz, elle s'est déroulée, en tout cas, dans un scénario théorique fortement imprégné des développements de l'électrodynamique continentale.

## LISTE DES ABREVIATIONS

Am. J. Phys. . . . .	American Journal of Physics
Ann. Chim. Phys. . . . .	Annales de Chimie et de Physique
Ann. Fac. Sci. Toulouse . . . . .	Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse
Ann. Ec. N. Sup. . . . .	Annales des Sciences de l'Ecole Normale Supérieure
Ann. Tel. . . . .	Annales Télégraphiques
Ann. Sci. . . . .	Annals of Science
Arch. Hist. Ex. Sci. . . . .	Archives for the History of Exact Sciences
Arch. Néerlandaises Sci. Ex. Nat. . . . .	Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles
Brit. J. Hist. Sci. . . . .	The British Journal for the History of Science
Brit. J. Phil. Sci. . . . .	The British Journal for the Philosophy of Science
Bull. Sci. Math. Ast. . . . .	Bulletin des Sciences Mathématiques et Astronomiques
C.R. . . . .	Comptes Rendus de l'Académie des Sciences
L'Eclairage Elect. . . . .	L'Eclairage Electrique
French Hist. Stud. . . . .	French Historical Studies
Hist. Sci. . . . .	History of Science
Hist. St. Phys. Sci. . . . .	Historical Studies in the Physical Sciences
J. Phys. . . . .	Journal de Physique
J. Math. . . . .	Journal des Mathématiques
J. Sav. . . . .	Journal des Savants
J. Hist. Ideas . . . . .	Journal of the History of Ideas
Lum. Elect. . . . .	Lumière Electrique
Mémoires Soc. Sci. Phys. Nat. Bordeaux . . . . .	Mémoires de la Société des Sciences Physiques et Naturelles de Bordeaux
Phil. Sci. . . . .	Philosophy of Science
Revue Cours Sci. . . . .	Revue des Cours Scientifiques
Revue Questions Sci. . . . .	Revue des Questions Scientifiques
Revue Gén. Sci. . . . .	Revue Générale des Sciences
Revue Gén. Sci. P. Appl. . . . .	Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées
Revue Sci. . . . .	Revue Scientifique
St. Hist. Phil. Sci. . . . .	Studies in History and Philosophy of Science

## NOTES DE L'INTRODUCTION ET DU CHAPITRE I

1. On a déjà remarqué la tendance à la diminution des controverses dans l'histoire des sciences comme conséquence d'une meilleure efficacité des moyens qui permettent d'instaurer un consensus, ainsi que de l'élargissement du consensus par l'intégration de communautés de savants qui gardaient une relative autonomie. Parmi les facteurs qui déterminent une telle tendance figurent ceux d'ordre institutionnel: l'amélioration du réseau de communication entre les scientifiques, associé à un plus grand contrôle de la diffusion des résultats de l'activité scientifique; la standardisation de leur formation, par l'intermédiaire de l'usage de plus en plus massif de manuels d'enseignement; la dépendance croissante de la recherche scientifique vis-à-vis de politiques définies au niveau des Etats, etc..
2. Feyerabend, dans une critique du concept de paradigme dans la théorie de la science de Kuhn, a mis en évidence que, pendant le XIX<sup>ème</sup> siècle, il y avait au moins trois paradigmes différents et mutuellement incompatibles. Il les caractérise de la façon suivante :
 

"...(1) Le point de vue mécaniste qui trouvait son expression en astronomie, dans la théorie cinétique, dans les nombreux modèles mécaniques en électrodynamique (...);

(2) Le point de vue associé à l'invention d'une théorie de la chaleur indépendante et phénoménologique, laquelle s'est montrée, finalement, incompatible avec la mécanique;

(3) Le point de vue implicite à l'électrodynamique de Faraday et Maxwell, ayant été développé et libéré de ses échafaudages mécaniques par Hertz".

Ces paradigmes, signale Feyerabend, n'étaient pas du tout 'quasi-indépendants'. Au contraire, ce fût leur interaction active qui a conduit à la chute de l'édifice de la physique classique. Voir Feyerabend, P.K., "Consolations for the Specialist", in Criticism and the Growth of Knowledge, Lakatos et Musgrave (eds.), 1970, p. 207.
3. Dolby R.G.A. "The transmission of science", p. 16
4. Cf. notamment Crosland M. et Smith C. "The transmission of physics from France to Britain : 1800-1840".
5. Cf. Crosland M.P. "The development of a professional career in science in France", Minerva, 1975.
6. Crosland et Smith (cit. n. 4), p. 60.
7. Sur cette thèse voir Herivel J.W. "Aspects of French theoretical physics in the nineteenth century", 1966/7.

8. Tout au long de ce travail nous allons faire usage d'abréviation pour désigner ces écrits. Par ordre de parution nous écrirons :
1. Mémoire FA
  2. Mémoire PH
  3. Mémoire DT
  4. Mémoire NO
  5. Treatise (ou Grand Traité)
  6. Elementary Treatise
9. Emile Verdet a été reçu en 1842 à l'Ecole Normale Supérieure et à l'Ecole Polytechnique; il choisit la première d'où il sort en 1845. Son excellente qualification au concours d'agrégation lui vaut immédiatement un poste au collège Henri IV à Paris. En 1848 il reçoit son doctorat à la Faculté des Sciences avec ses "recherches sur les phénomènes d'induction produits par les décharges électriques". A l'âge de 23 ans il est déjà maître de conférences à l'Ecole Normale. A partir de 1852 il devient examinateur à l'Ecole Polytechnique, où en 1862 il remplace Senarmont comme professeur de physique. En 1863 il succède Lamé en devenant titulaire de la chaire de Physique Mathématique à la Sorbonne.
10. DE LA RIVE, "Notice sur E. Verdet", in OEUVRES DE EMILE VERDET, 1872, vol. 1, p. xii.
11. E. Verdet a fait deux conférences sur la conservation de l'énergie à la Société Chimique de Paris en 1863.
12. Frankel E. "Verdet, Emile", D.S.B. 13(1976), p. 614-5.
13. Levistal A. "Notice sur E. Verdet", Annales Scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure, 3(1866), pp. 343-351.
14. De l'importance de Verdet nous pourrions citer: J. Bertrand (1822-1900), Regnault (1810-1878), Lamé (1795-1870), Briot (1817-1882), Fizeau (1819-1896), Jamin (1818-1886), Gaugain (1810-1880). Sans avoir la prétention de donner une liste exhaustive, nous avons également rencontré, au cours de nos recherches, les noms de E. Becquerel (1820-1891), Marié-Davy (1820-1893). A partir des années 70 une nouvelle génération de physiciens a pris le relais de ces savants. Sur la situation de la recherche en physique théorique en France au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, voir l'article de Herivel: "Aspects of French Theoretical Physics in the XIX<sup>th</sup> century".
15. Verdet E. "Recherches sur les propriétés optiques développées dans les corps transparents par l'action du magnétisme" (1854-1863).

16. Ibid., Ann. Ch. Phys. 52(1858), p.156.
17. Ibid., Ann. Ch. Phys. 69(1863), p.218.
18. Ibid., p.234.
19. Dans la rotation naturelle, si l'on fait passer le rayon lumineux d'abord dans une direction et ensuite dans la direction contraire, à travers le corps naturellement actif, la rotation finale est nulle parce qu'elle se fait d'abord dans un sens et ensuite dans le sens opposé. Dans le phénomène de rotation magnétique, par contre, la rotation du plan de polarisation de la lumière est doublée dans les mêmes circonstances.
20. Verdet (cit. n.17), p.252
21. La première version de cette théorie a été proposée par Neumann en 1858.
22. Verdet (cit. n.17), p.254
23. Ibid., p.255, note.
24. Maxwell, mémoire PH, p.510, eqs. 148.
25. Maxwell, mémoire PH, p.506.
26. Verdet (cit. n.17), p.266.
27. Verdet, C.R., séance du 6 avril 1863. Dans cette note, dit-il, "j'aurais ajouté qu'au degré de précision où elles avaient pu être portées les expériences ne permettaient pas de faire un choix entre les équations de M. Maxwell et les équations de forme toute différente qui conduisent aux formules (VI)". Il fait ici référence aux théories qui mènent aux eqs. (III), p.266.
28. Ibid., p.267
29. Ibid., p.263
30. DE LA RIVE, "Notice sur Emile Verdet", p.vi
31. Ibid., p.vii
32. Ibid., p.xvii
33. Publié dans la Revue Scientifique, 8(1871), 1871. Ce texte avait été présenté par Maxwell dans le Congrès de Liverpool de la British Association for the Advancement of Science.

34. Publié dans la Revue Scientifique, 12(1873).
35. Publié également dans la Revue Scientifique, 12(1873).
36. Maxwell J.C. Traité Elementaire d'Electricité, traduit par Gustave RICHARD (Ingénieur civil des Mines), 1884. Avec une "Notice sur les travaux scientifiques du prof. Maxwell" par W. Garnett.
37. Poincaré H. préface à l'ouvrage de A. Devaux: Etat actuel de la science électrique, 1908.
38. Cazenobe J. La Visée et l'Obstacle, p.8.
39. Il faudrait, par exemple, déterminer le rôle qu'a pu jouer l'Ecole Supérieure de Télégraphie dans la réception des théories de Maxwell en France. Nous voulons signaler ici les travaux de A. Vaschy, qui était enseignant dans cette école, sur les théories de Maxwell. Dès 1886 dans son article "Sur la nature des actions électriques dans un milieu isolant" (C.R., t.103, 1886, p.1186-1189), nous le voyons discuter les idées de Maxwell. Dans son Traité d'Electricité et de Magnétisme (1890), il emploie plusieurs concepts empruntés à ce savant. Dans le but de respecter certaines limites dans ce travail, nous avons éliminé une analyse, prévue initialement, de l'oeuvre de Vaschy, qui a sûrement joué un rôle important dans la réception en France des théories de Maxwell en électricité et magnétisme.
40. Cf. Chalmers "The limitations of Maxwell's electromagnetic theory", p.474.
41. Gordon J.E.H. Traité Expérimental d'Electricité et de Magnétisme, 2 vols., Paris, 1881. Traduit par J. Raynaud (Docteur ès sciences, Prof. à l'Ecole supérieure de télégraphie), avec le concours de Seligmann-Lui (Ingénieur des télégraphes). Avec une introduction de A. Cornu, très intéressante. Voir aussi l'appendice de Raynaud: "Sur l'éther", vol.I, p.236. La 1<sup>ère</sup> ed. de cet ouvrage est parue en 1880.
42. Maxwell J.C. Traité d'Electricité et de Magnétisme, traduit de l'anglais sur la 2<sup>ème</sup> ed., par G. Seligmann-Lui (Ancien élève de l'Ecole Polytechnique, Ingénieur des Télégraphes), avec Notes et Eclaircissements par M.M. Cornu, de l'Institut, Potier et Sarrau, Professeurs à l'Ecole Polytechnique, tome I, 1885; tome II, 1887.

## NOTES DU CHAPITRE II

1. Bertrand a été reçu à l'Ecole Polytechnique en 1839 dont il est devenu examinateur d'admission à partir de 1843. En 1847 il remplace déjà Biôt au Collège de France, et il lui succède à partir de 1862 en devenant le titulaire de la chaire de Physique Mathématique. Il y a enseigné jusqu'en 1873, dans une première période. Après une longue absence pendant laquelle il s'est fait remplacer par Laguerre, Bertrand reprend l'enseignement au Collège de France en 1886. Ses Leçons sur la théorie mathématique de l'électricité (1890), sont, notamment, éditées ayant pour base cette dernière période d'enseignement. Bertrand a aussi été Maître de Conférence à Ecole Normale de 1857 à 1862. En 1856 il est élu à l'Académie des Sciences dont il devient secrétaire perpétuel à partir de 1884 (en remplaçant Dumas). De 1865 jusqu'à sa mort il est l'éditeur du Journal des Savants, où il a publié plusieurs de ses articles, dont celui qui fera l'objet de notre analyse par la suite. Il a aussi écrit plusieurs ELOGES, dont un de FARADAY.
2. Brillouin M. "Joseph Bertrand. Son enseignement au Collège de France", Revue Gen. Sci. P. App., (1901), p.115.
3. Darboux "Eloge de J. Bertrand" in J. Bertrand, Eloges Académiques, Paris, 1982, p. 8-51.
4. Bertrand J. "Compte rendu de l'ouvrage A treatise on electricity and magnetism", 1873.
5. Ibid., p.155
6. Ibid., p. 456
7. Ibid., p. 457
8. Ibid., p.461
9. Ibid.,p.462
10. Bertrand J. Leçons sur la théorie mathématique de l'électricité, 1890, pp.60-61.
11. Voir, à ce sujet:
  - Moyer, "Energy, Dynamics, Hidden Machinery; Rankine, Thomson and Tait, Maxwell".
  - Smith, "A new chart for British Natural Philosophy; the development of energy physics in the nineteenth Century".
12. Bertrand J. "Renaissance de la physique cartésienne", 1869, p.596.

13. Ibid., 1870, pp.453-454.
14. Bertrand J. "Compte rendu de l'ouvrage Electricité et Optique, vol. I", 1981, p. 742.
15. Bertrand J. (cit. n. 10) p.208.
16. Ampère Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience, 1826, p.1.  
Ampère, lui même, malgré la fidélité aux PRINCIPIA qu'il affiche dans le début de son mémoire de 1827, ne peut, cependant pas être considéré un adepte de l'orthodoxie Newtonienne. La formule électrodynamique qu'il propose concerne, d'abord, des "éléments de courants" et non pas des particules matérielles. Il va falloir attendre Weber pour qu'une loi d'interaction entre particules électriques soit proposée (et, paradoxalement, critiquée sur des bases aussi Newtoniennes). Un autre Ampère, plus spéculatif, ne s'est pas empêché de songer à un éther qui pourrait expliquer l'interaction électrodynamique. La théorie du magnétisme d'Ampère a aussi rencontré beaucoup de résistance du côté des Laplaciens. Il n'empêche que les positions très Newtoniennes du début du mémoire de 1827 ont probablement constitué un paradigme pour les générations de physiciens français qui l'ont suivi, à côté du courant plus "purement" Laplacien représenté par Poisson. Nous pouvions aussi ajouter, comme une autre hypothèse historiographique, que le "dernier" Ampère, l' "étherien", ait aussi nourri un autre courant de recherches en France, mais qui probablement est resté marginal dans le domaine de l'électricité et du magnétisme. Voir, à ce sujet, Fox " The rise and fall of Laplacian Physics".
17. Bertrand J. "Note sur la théorie mathématique de l'électricité dynamique", C.R., 73 (1871)  
-"Sur la démonstration de la formule qui représente l'action élémentaire de deux courants"; "Observations présentées à l'occasion d'une note de M. Helmholtz sur l'électrodynamique", C.R., 75 (1872)  
-"Action mutuelle des courants voltaïques"; "Examen de la loi proposée par M. Helmholtz pour représenter l'action de deux éléments de courant", C.R., 77 (1873).  
-"Note sur l'action de deux éléments de courant"; "Sur un nouveau mémoire de M. Helmholtz sur électrodynamique", C.R., 79 (1874).
18. Poincaré H. Electricité et Optique, vol. II, p. 50.
19. Il est amusant que, plus tard, Duhem critique le concept de courant de déplacement chez Maxwell avec ces mêmes arguments et prend la défense de Helmholtz ( Voir ch. 6 section 8 ).
20. Bertrand J. (cit. n. 17) C.R. 77 (1873), p. 1049.
21. Reynard F. "Lettre présentant une "Note sur le mode d'action des

- forces électrodynamiques", 1864, p. 959.
22. Reynard, F. "Sur la théorie des actions électrodynamiques", 1868.
  23. Reynard, F. "Nouvelle théorie des actions électrodynamiques", 1870.
  24. Mascart et Joubert, Leçons sur l'électricité et le magnétisme, pp. 525-526.
  25. Mandrion, L'Académie des Sciences, prix fondés par M. Bourdin pour les sections des sciences mathématiques et sciences physiques.
  26. Il est intéressant de comparer le sujet de ce prix avec celui proposé par l'Académie de Berlin l'année suivante: "To establish experimentally any relation between electromagnetic forces and the dielectric polarization of insulators..." (Hertz, introduction a ELECTRIC WAVES). Le sujet proposé par l'Académie de Berlin est post-Maxwellien, puisqu'il concerne les effets électromagnétiques des courants de déplacement. Le sujet proposée par l'Académie française se situe dans le contexte de l'électrodynamique classique d'Ampère.
  27. Bertrand, J. "Rapport sur le mémoire de Reynard : Une nouvelle sur la théorie des actions électrodynamiques", 1869, p. 1156.
  28. Ibid., p. 1247.
  29. Liouville J. "Note sur l'Electro-dynamique", Bulletin Ferrusac des Sciences Mathématiques, 15/16 (1831), p. 29-31.
  30. Bertrand J. (cit. n. 10), p. 213.
  31. Turner "Helmholtz, H. von", Dictionary of Scientific Biography 6 (1872), pp. 250-251.
  32. Wise M. N. "German concepts of force, energy, and the electro-magnetic ether: 1845-1880", p. 301.
  33. Harman P. M. Energy, Force and Matter: the conceptual development of Nineteenth-Century Physics, p. 107.
  34. A. Potier (1840-1905) a étudié à l'Ecole Polytechnique de 1857 à 1859. Il y devient repetiteur à partir de 1867 et professeur à partir de 1881. En 1891 il succede E. Becquerel à l'Académie des Sciences. En 1884 il devient le president de la Société de Physique et en 1895 de la Société Internationale des Electriciens. Il a participé activement à l'Exposition Internationale d'Electricité de 1881.
  35. Cf. Potier A. "Rélacion entre le pouvoir rotatoire magnétique et

- l'entraînement des ondes lumineuses par la matière pondérable",  
C.R., 108 (1889).
36. Blondel "Avertissement" in Potier Mémoires sur l'électricité et l'optique, 1912.
  37. Poincaré H. "Préface" in Potier A. Mémoires sur l'électricité et le magnétisme, 1912.
  38. Potier A. "Egalité des constantes numériques fondamentales de l'optique et de l'électricité", 1873, pp. 377-378.
  39. Voir à ce sujet:
    - Rosenfeld L. "The velocity of light and the evolution of electro-dynamics",
    - Wise M.N. "German concepts of force, energy and the electromagnetic ether: 1845-1880."
  40. Dans son Cours de Physique (1892-1893), Potier présente une reconstruction différente: "En cherchant à donner une forme plus concrète aux idées de Faraday, Maxwell est arrivé à ce résultat, que la vitesse de propagation devait être le rapport des unités électro-magnétiques et électrostatiques..." Cf. Potier A. Mémoires... p. 63.
  41. Nous présenterons, plus tard, d'autres évidences qui nous font croire que Maxwell a été reçu plutôt à travers ses contributions en Optique, et non pas dans le contexte d'un débat sur des hypothèses concernant le mode de transmission de la force. Le compte rendu de Bertrand semble donc, soulever une problématique marginale à l'intérieur de l'histoire de la réception des théories de Maxwell en France.
  42. Potier A. (cit. n. 38), p. 378.
  43. Voir, à ce sujet, le ch. VI, section VI.8 .
  44. Dans son Cours de Physique (1893-1894), Potier suit le même cheminement.
  45. Potier A. (cit. n. 38), p. 379.
  46. Cf. Maxwell J. C. A treatise on Electricity and Magnetism, 2<sup>o</sup> ed., §§ 60-1.
  47. Potier A. (cit. n. 38), p. 382.
  48. Ibid., p. 383.
  49. Ibid., p. 382.
  50. Ibid., p. 383.
  51. Ibid., p. 388.

## NOTES DU CHAPITRE III

1. Kuhn T. S. La Structure des Révolutions Scientifiques, trad. française, Flammarion, 1972.
2. Les leçons de Poincaré et celles de Duhem, feront l'objet d'analyses plus approfondies et ne sont pas incluses dans le présent chapitre. Nous attribuons, en fait, un statut différent aux leçons de ces deux auteurs. Celles de Poincaré, par exemple, traitent des théories de Maxwell d'une façon critique, et les incorporent à l'intérieur d'un programme de recherches plus large. Nous verrons que cela n'a pas lieu, au moins d'une façon systématique, dans les cours que nous analyserons par la suite.
3. E. Mascart ( 1837-1908 ), a étudié pendant trois ans à l'Ecole Normale, à partir de 1858. Il a comme professeurs, notamment, Briot (Mathématiques) et Verdet (Physique). Agrégé en sciences physiques dès 1861, il obtient son doctorat en 1864. En 1865 il remplace Verdet à l'Ecole Normale pour quelques mois; il devient suppléant de Régnault au Collège de France en 1868. Il y est élu comme substitut de Régnault en 1872, poste qu'il occupe jusqu'à sa mort. En 1873 il devient directeur au Bureau Central Météorologique. Mascart est élu membre de l'Académie des Sciences, au siège occupé antérieurement par Jamin, en 1884. Il assure la présidence du Congrès International des Electriciens en 1881.
4. Janet P. "La vie et les oeuvres de E. Mascart" - Revue des Sciences pures et appliquées, 20, (1909).
5. Rapport sur le Prix des Sciences Mathématiques de l'Académie des Sciences de l'année 1870". C.R., 79 (1874), 1531-1534.
6. Mascart E. "Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur", Ann. de l'Ecole Normale, 1 (1872), p. 157-214; 3(1874), p. 363-420.
7. Cf. Hirose T. "The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity".
8. Nous allons utiliser tout au long de cette section cette abréviation pour désigner l'ouvrage de Mascart E. et Joubert J. Leçons sur l'électricité et le magnétisme, 1<sup>o</sup> ed., 2 vol: I, 1882; II, 1886.
9. Les Leçons de Mascart et Joubert ont été traduites en anglais en 1883.
10. Mascart et Joubert ( cit. n. 8 ), I, p. 102.
11. Les Leçons sur la théorie mathématique de l'électricité de Bertrand figurent dans la bibliographie qui nous donne Mascart dans la Préface à son Traité d'Electricité Statique, 1876. Il y mentionne également les ouvrages: Riess Leçons d'Electricité Statique; Thomson W. Papers on Electrostatics and Magnetism et Briot C. Théorie mécanique de la chaleur.

12. Mascart et Joubert ( cit. n. 8 ), I, p. 105.
13. Cf. Heimann P.M. "Maxwell and the modes of consistent representation".
14. Mascart et Joubert ( cit. n. 8 ), I, p. 109.
15. Ibid., p. 112.
16. Mascart ( cit. n. 11 ), p. 483.
17. Cette preuve n'est pas donnée dans la 1<sup>o</sup> ed.. Dans la 2<sup>o</sup> ed. des Leçons ( 1896 ), une théorie complète des diélectriques est développée en supposant que chaque élément de volume du diélectrique agit comme un dipôle électrique ( voir la section 3 du Chapitre V ).
18. Nous verrons que ces résultats de la théorie de Poisson-Mossotti ont été souvent comparés, en France, à ceux obtenus par Maxwell dans le § 83 du TREATISE par un raisonnement tout à fait différent qui ne suppose pas cette théorie. Ce raisonnement de Maxwell a été critiqué notamment par Potier et Mathieu. Les Leçons de Mascart et Joubert ne font aucune allusion à ce raisonnement.
19. Mascart et Joubert ( cit. n. 8 ), I, p.128.
20. Ibid., p. 128.
21. Ibid., p. 129.
22. Ibid., p. 526.
23. Ibid., p. 566-567.
24. Ibid., p. 571.
25. Ibid., p. 617.
26. Ibid., p. 623.
27. Ibid., p. 680.
28. Voir Appendice B.
29. Mascart et Joubert ( cit. n. 8 ), I, p. 688-689.
30. Ibid., p. 689.
31. Ibid., p. 695.
32. Ibid., p. 696.
33. in Actes du Congrès International des Electriciens, Paris, 1881, p. 222.

34. L'auteur de cette note a lui-même développé une méthode de mesure de ce rapport. Cf. Stoletov A. "Sur une méthode pour déterminer le rapport des unités électromagnétiques et électrostatiques ( le  $v$  de Maxwell )", 1881. Stoletov publiera en 1890 un article très important sur la théorie électromagnétique de la lumière, avec le titre "L'éther et l'électricité".
35. J. Jamin a étudié à l'Ecole Normale, où il est reçu en 1838. Il a en comme professeurs Briot et Verdet, notamment. Il obtient son grade de docteur ès sciences physiques en 1847 avec une thèse sur "la réflexion de la lumière à la surface des métaux". Son enseignement à l'Ecole Polytechnique s'étend de 1852 à 1861. Il a aussi été professeur à la Faculté des Sciences de Paris dès 1863. Jamin rentre à l'Académie des Sciences en 1868. Il s'est chargé de l'organisation des laboratoires de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes (voir notice nécrologique dans Lumière Electrique, (1886), ainsi que les discours de Bertrand et Troost dans C.R. 102 (1886) ).
36. La différence de niveau entre le Cours de 1863/1869 et celui de 1878/1883 laisse penser qu'ils étaient destinés à des publics différents; Nous n'avons pas pu trouver des informations à ce sujet. Nous allons hasarder l'hypothèse que la collaboration de E. Bouty, à partir de la 3<sup>e</sup> ed. des Cours de Jamin, a été essentielle à l'actualisation des contenus. Ainsi, le tome I de cette édition incorpore un "supplément" écrit entièrement par Bouty, sur la théorie du potentiel. C'est à partir de la 3<sup>e</sup> ed. que le vol. III, portant sur l'étude des phénomènes électriques et magnétiques (publié en 1883), est augmenté d'un chapitre sur les "Théories Générales" parmi lesquelles sont rangées les théories de Maxwell.
37. Jamin J.C. Cours de physique de l'Ecole Polytechnique, 3<sup>e</sup> ed., vol. I, 1878, p. 2.
38. Ibid. p. 4.
39. Ibid., p.7.
40. Ibid., p.3.
41. Ibid., p.9.
42. Jamin (cit. n. 37), vol. IV, 1883, p. 439.
43. Il est probable que Bouty ait beaucoup contribué à ces modifications.
44. Pour le sens que nous donnons au terme "réalisme", voir la section 1 du chapitre V.
45. Jamin fait ici explicitement référence à la preuve de Poincaré de l'introduction de son ouvrage Electricité et Optique. Voir la section 1 du chapitre V.

46. Jamin Cours de physique de l'Ecole Polytechnique, 4<sup>o</sup>ed., vol. IV, 4<sup>o</sup> partie, 1891, p. 183-184.
47. Jamin (cit. n. 37), vol. IV, p. 467.
48. Jamin (cit. n. 46), p. 205.
49. Les Leçons de Mascart et Joubert sont, d'ailleurs, citées par Jamin.
50. Jamin (cit. n. 37), vol. IV, p. 469.
51. La théorie des diélectriques de Clausius est, cependant, exposée dans la 1<sup>o</sup> partie du 4<sup>o</sup> volume de la 4<sup>o</sup> ed. (chapitre IX sur le pouvoir inducteur spécifique).
52. Jamin (cit. n. 46), p. 208.
53. Jamin (cit. n. 46), p. 210.
54. Jamin (cit. n. 37), vol. IV, p. 479.
55. Ibid., p. 483.
56. Jamin (cit. n. 46), p. 226.
57. Potier A. Cours de Physique professé à l'Ecole Polytechnique, 1<sup>o</sup> division, 1887-1888, p. 408.
58. Potier A. Cours de Physique, professé à l'Ecole Polytechnique, 2<sup>o</sup> division, 1882-1883, p. 223.
59. Potier A. "La théorie Electromagnétique de la Lumière", extrait du Cours de Physique professé à l'Ecole Polytechnique, 1893, in Memoires sur l'électricité et l'optique, p. 82.
60. Ibid., p. 63-64.
61. Thomson W. "Molecular Dynamics" in Brillouin (trad.), Conférences Scientifiques et Allocutions de W. Thomson, 1893, p. 299.
62. Stoletov A. "L'éther et l'électricité", 1890, p. 517.

## NOTES DU CHAPITRE IV

1. Dolby R.G.A. "The transmission of science".
2. Duhem P. Leçons sur l'électricité et le magnétisme, tome II, 1932, ch. 3, p. 456.
3. Emile Mathieu (1835-1890) a étudié à l'Ecole Polytechnique. Il obtient son Doctorat en 1859 avec une thèse en mathématiques, domaine auquel il s'est d'abord penché et, plus tard, la physique mathématique. En 1862 Lamé le propose à la section de géométrie de l'Académie des Sciences mais son nom n'a pas été retenu. En 1866 il est à nouveau proposé par Lamé pour remplacer ce dernier dans la chaire de Physique Mathématique et de Théorie des probabilités de la Sorbonne mais, encore une fois, un autre que lui est choisi. En 1867 il accepte d'assurer le "Cours Complémentaire de Physique Mathématique" à la Sorbonne, mais comme ce poste n'offre aucune stabilité, il préfère en 1869 occuper le poste de physique mathématique à Besançon et en 1873 à Nancy, où il a travaillé jusqu'à sa mort. Malgré l'importance de ses travaux et la reconnaissance qu'il avait de la part de certains savants de renom et pouvoir, comme J. Bertrand, il n'a jamais pu avoir un poste stable à Paris, ni être élu, au moins comme correspondant, à l'Académie des Sciences. Cf. Floquet G., "Notice sur E. Mathieu, sa vie et ses travaux", Bulletin de la Société des Sciences de Nancy, 2<sup>o</sup> s., 11 (1891), pp. 1-34 et le Dictionary of Scientific Biography.
4. Duhem P. "Emilie Mathieu, his life and works", Bulletin of the New York Mathematical Society, 1 (1892), p. 156-157.
5. Ibid., p. 161.
6. Ibid., p. 162.
7. Ibid., p. 165.
8. Duhem P. L'évolution de la Mécanique, 1903, p. 77.
9. Cf. Maxwell Treatise on Electricity and Magnetism, 4<sup>o</sup> partie, ch. XXII.
10. Duhem P. (cit. n. 4), p. 164.
11. Voir notamment: Herivel J.W. "Aspects of French Theoretical Physics in the XIX Century" et Gilpin R. France in the age of Scientific State (Princeton, 1968). Pour une appréciation différente se référer à: Paul H.W. "The issue of decline in nineteenth-century French Science", French Historical Studies, 7 (1972), p. 416-450.
12. Nous utiliserons, tout au long de cette section, cette abréviation pour désigner l'ouvrage de Mathieu E. Théorie du potentiel et ses

applications à l'électrostatique et au magnétisme, 1.<sup>e</sup> partie: Théorie du Potentiel, 1886; 2<sup>o</sup> partie: Electrostatique et Magnétisme", 1886.

13. Ibid., p. 104.
14. Mathieu utilise la 2<sup>o</sup> ed. du Treatise, tandis que Mascart et Joubert se réfèrent à la 1<sup>o</sup> ed. de cet ouvrage. Maxwell a entièrement modifié le mode de présentation de sa théorie des pressions et des tensions dans les milieux diélectriques (ch. 5, 1<sup>o</sup> partie, du Treatise ) dans la 2<sup>o</sup> ed. Notamment il ne fait plus usage de la notion de "tube de force" pour arriver aux résultats de cette théorie.
15. Mathieu utilise tout au long le terme "force élastique" pour désigner "l'effort" (stress), c'est à dire, une force par unité de surface. Dans notre texte ces deux termes seront, donc, des synonymes. De la même façon "déplacement" sera un synonyme de "déformation" (strain).
16. Mathieu (cit. n. 12), p. 110.
17. Les constantes élastiques  $\lambda$  et  $\mu$  sont telles que  $\lambda = K - 2/3\mu$ , où K est le "module de compression", et  $\mu$  est le "module de rigidité". Love les définit ainsi: "the modulus of compression, or bulk-modulus of an isotropic solid is the quantity obtained by dividing the uniform dilatation produced by it". "The modulus of rigidity is the quantity obtained by dividing the uniform tangential stress by the shear produced by it". Cf. Love A. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, vol. I, p. 72.
18. L'eg. (4) est analogue à celle qui exprime l'incompressibilité d'un milieu fluide.
19. Mathieu (cit. n. 12), p. 112.
20. Ibid., p. 114.
21. Ibid., p. 117.
22. Ibid., p. 131.
23. Mathieu attribue la théorie qu'il développera par la suite à Clausius (1866). Il met en évidence, cependant, les corrections qu'il a apportées à cette formulation.
24. Nous avons supposé que les armatures sont des surfaces planes et parallèles, pour simplifier les équations. Mathieu expose la théorie d'un condensateur de géométrie quelconque.
25. Mathieu (cit. n. 12), p. 186.
26. Le coefficient de polarisation  $\chi$  est défini par l'expression:

$1/\gamma = 4\pi(1-K)/K$ , où K est le rapport entre le volume occupé par l'ensemble des "sphères conductrices" de Mossotti et le volume total du diélectrique.

27. Mathieu E. Théorie de l'électrodynamique, 1888.
28. Ibid., p.76.
29. Ibid., p.83.
30. Mathieu E. "Réflexions sur les principes mathématiques de l'électrodynamique", Ann. Ec. N. Sup., 1880.
31. Mathieu (cit. n. 27), p.70.
32. Duhem, qui a eu entre les mains les fragments de ce qui serait le huitième tome du Traité de Physique Mathématique de E. Mathieu, rapporte qu'ils sont des "notes" vraisemblablement pas très développés. Il affirme avoir réussi à entrevoir le plan du travail: "an exposition of the traditional science of optics as elaborated, after Fresnel, by Green, MacCullagh, Newmann, Lamé, and G. Kirchhoff". Duhem P. (cit. n.4), p.163.
33. Louis Marcel Brillouin (1854/1948) a étudié à l'Ecole Normale Supérieure de 1874, où il devient Maître de Conférences à partir de 1888. Il obtient son doctorat en mathématiques et en physique en 1881. Brillouin a aussi eu des postes de professeur de physique dans des universités de Province: Nancy, Dijon et Toulouse. A partir de 1900 il devient professeur de physique mathématique au Collège de France, une chaire qu'il occupe jusqu'à 1931. Avant il a été assistant de Mascart dans cette même institution. Brillouin devient membre de l'Académie des Sciences en 1921.
34. Voir ses notes aux Conférences Scientifiques et Allocutions de W. Thomson, 1893.
35. Brillouin M. "Compte Rendu d'Electricité et Optique I et II", 1891.
36. Brillouin M. Propagation de l'Electricité, 1904, § 298.
37. Ibid., "Avant-Propos".
38. Cf. World's Who in Science et Brillouin (ed.) "Les théories d'Einstein: une nouvelle figure du monde" de L. Fabre, Paris, 1922.
39. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism, vol. 1, § 111.
40. Brillouin M. "Essai sur les lois d'élasticité d'un milieu capable de transmettre des actions en raison inverse du carré: de la distance", 1887, p.203.

41. Ibid., p. 204.
42. Ibid., p. 204. Brillouin se réfère ici aux leçons de W. Thomson "On the molecular motions" in Conférences Scientifiques et Allocutions de W. Thomson (Brillouin ed.)
43. Brillouin (cit. n. 40), p. 205.
44. Cf. Wise "German concepts of force, energy, and the electromagnetic ether: 1845-1880", p. 270.
45. Voir le chapitre V, section 4, plus bas.
46. Brillouin (cit. n. 40), p. 206.
47. Cf. Hirose T. "Origins of Lorentz's theory of electrons and the concept of the electromagnetic field".
48. Brillouin (cit. n. 40), p. 207.
49. Ibid., p. 208.
50. Ibid., p. 209.
51. Ibid., p. 213.

52. Ces expressions sont:

$$E = \frac{K}{8\pi} \iiint \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz$$

$$E = \frac{1}{2} \iiint V \mu dx dy dz$$

où  $V$  est, comme d'habitude, le potentiel électrostatique, et  $\mu$  la densité volumétrique de charge.

53. Brillouin (cit. n. 40), p. 215.
54. Ibid., p. 216. Voir aussi Maxwell, mémoire DT, p. 570.
55. Ces expressions, mathématiquement équivalentes, sont:

$$\frac{1}{8\pi} \iiint (F_x + G_y + H_z) dx dy dz = \frac{K}{8\pi} \iiint (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) dx dy dz$$

où  $(\alpha, \beta, \gamma)$  sont les composantes de la force magnétique, et  $(F, G, H)$  les composantes de l'état électrotonique, qui vérifient les conditions:

$$K\alpha = \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\partial G}{\partial z}; K\beta = \frac{\partial F}{\partial z} - \frac{\partial H}{\partial x}; K\gamma = \frac{\partial G}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial y}$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0$$

$$4\pi K\alpha = -\Delta_z F ; 4\pi K\beta = -\Delta_z G ; 4\pi K\omega = -\Delta_z H$$

56. Ibid., p. 218.
57. Ibid., p. 219. L'égalité des actions tangentielles est une des conditions pour un milieu solide en équilibre d'élasticité. Voir Lamé A. Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité, deuxième leçon.
58. Ibid., p. 221.
59. Ibid., p. 222.
60. Poincaré va d'abord essayer de donner une interprétation mécanique de la théorie du déplacement électrique qui suppose, justement, la proportionnalité entre la force électrique et le déplacement électrique. Il va interpréter ce déplacement comme une certaine déformation d'un milieu. Après avoir donné cette interprétation (où le diélectrique est supposé se comporter comme un milieu fluide), Poincaré va démontrer qu'elle est incompatible avec les expressions des efforts du milieu données par Maxwell. Cette conclusion est considérée, par lui, comme une preuve de l'impossibilité de supposer, pour le milieu électromagnétique, que l'effort est proportionnel à la déformation, son hypothèse de départ. Mathieu, comme nous l'avons montré, suit le chemin inverse de Poincaré. En prouvant la même proposition énoncée par Brillouin, il essaiera de considérer le milieu diélectrique comme un fluide. Toutefois, il ne se soucie pas de savoir, comme Poincaré, si cette interprétation est compatible avec les expressions des efforts du milieu. Sans le dire explicitement, Mathieu laisse tomber toute tentative de rendre compte des actions électrostatiques et électrodynamiques par action contiguë médiatisée.
61. Brillouin (cit. n. 40), pp. 224-226.
62. Ibid., p. 227.
63. Ibid., p. 231.
64. Ibid., p. 238.
65. Ibid., p. 240.
66. Brillouin M. "Compte Rendu de Electricité et Optique I et II", 1891, p. 131.
67. Brillouin M. "Sur les dimensions des unités électriques" in Conférences Scientifiques et Allocutions de W. Thomson, p. 298-300.
68. Ostwald W. "La déroute de l'atomisme contemporain", 1895, p. 955.

69. Ibid., p. 956.
70. Ibid., p. 957-958.
71. Cornu A. "Quelques mots de réponse à "La déroute de l'atomisme contemporain", 1895, p. 1030.
72. Brillouin M. "Pour la matière", 1895, p. 1033.

## NOTES DU CHAPITRE V

1. Cf. notamment les articles de Goldberg, Hirosige et Miller de la bibliographie.
2. Cf. La Science et l'hypothèse, ch.XII : "L'Optique et l'Electricité".
3. Cet aspect a apparemment échappé à l'examen des historiens à cause d'une erreur faite dans la publication du vol. I de Electricité et Optique. On peut y lire que le volume reproduit les leçons de Poincaré faites de mars à juin de 1889. Dans la préface du deuxième volume de cet ouvrage, Poincaré mentionne cette faute : les leçons ont été, en fait, professées au début de 1888.
4. Poincaré H. Electricité et Optique, 1<sup>è</sup> ed., vol. I, 1890, p. xviii.
5. Ibid., p. 203.
6. Ibid., p. xviii.
7. Le terme "mécaniste" peut prendre deux significations (au moins) très différentes. Il peut désigner la doctrine selon laquelle tous les phénomènes physiques sont, en dernière instance, des phénomènes mécaniques, c'est-à-dire réductibles à la matière et au mouvement. Dans son expression radicale, chez Hertz notamment, même le concept de force est exclu, toute force étant considérée comme "fictive", résultat d'un mouvement caché quelconque.  
Le terme "mécaniste" peut aussi désigner la doctrine selon laquelle les lois des phénomènes physiques peuvent prendre toujours la forme des lois de la Mécanique Rationnelle. Dans ce sens le terme n'a pas de connotations ontologiques.  
Il est important pour nous de distinguer ces deux significations. En effet, Poincaré est partisan du "mécanisme" dans le deuxième sens, mais non pas dans le premier. Nous verrons qu'il va critiquer la première doctrine adoptée par le "lecteur français".  
De façon à faire cette distinction, nous faisons usage du terme "réaliste" pour désigner la doctrine - que critiquent Poincaré et Duhem - d'après laquelle la théorie physique a comme "objet" (but) de dévoiler une réalité (essence) derrière les phénomènes. Ou encore que la théorie physique vise à expliquer les phénomènes en faisant appel à des hypothèses de caractère ontologique. Nous pourrions aussi utiliser au lieu de "réalisme" le terme "essentialisme", employé par Popper et Lakatos. Néanmoins, ce terme a chez ces auteurs une détermination supplémentaire : il désigne la doctrine d'après laquelle les explications doivent être "ultimes", c'est-à-dire, irréductibles (voir par exemple Lakatos I.

The Methodology of Scientific Research Programmes, vol. I, pp. 41 194 et 201). A la doctrine "réaliste ou "essentialiste" s'oppose l'"instrumentalisme", doctrine qui soutient que les théories scientifiques sont des simples "instruments" n'ayant aucune valeur de vérité (dans le sens d'atteindre une réalité "objective"). Nous verrons que Duhem critiquera, sans utiliser toutefois ce terme, l'instrumentalisme de Poincaré. Quand nous appelons donc la doctrine du "lecteur français" de "mécaniste" et "réaliste", nous nous référons à ce qu'elle soutient que les "théories physiques" doivent être des "théories mécaniques" qui supposent des hypothèses de base spécifiant les composants d'une matière et leurs mouvements. Ce type particulier de théorie mécanique doit être distinguée d'une "théorie dynamique" comme celle conçue par Maxwell dans son troisième mémoire.

8. Poincaré H. (cit.n. 4), p. v.
9. Ibid., p. vi.
10. Ibid., p. xvi.
11. Nous utiliserons dans cette analyse les termes "objet" et "structure" dans le sens qu'en donne Duhem. Cette nomenclature n'est pas utilisée par Poincaré. Nous croyons, cependant, que l'usage de ces termes ne dénature pas sa pensée.
12. Ibid., p. vi.
13. Ibid., p. 168.
14. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism, § 331.
15. Cf. le paragraphe qui précède celui qu'on vient de citer. Voir aussi les paragraphes 110, 111, 574 du Treatise.
16. Poincaré (cit.n. 4), p. x.
17. Mario Bunge se réfère à ce raisonnement de Poincaré pour mettre en évidence la croyance, très répandue au XIX siècle, que le fait de donner la formulation Lagrangienne d'une théorie conduit à prouver la possibilité d'une explication mécanique de cette théorie. D'après lui cette idée "is particularly persistent among French metascientists" (note 13, p. 217). Son article, d'ailleurs fort intéressant, montre que cette formulation a plutôt conduit à la démécanisation de la physique, puisqu'elle fait économie de la connaissance du mécanisme hypothétique sous-jacent aux phénomènes. Bunge montre ainsi que la formulation Lagrangienne ne suppose aucune interprétation mécanique des grandeurs de la théorie, et qu'elle s'applique aussi bien à des théories non-mécaniques. Cf. Bunge M. "Lagrangian Formulation and Mechanical Interpretation".

18. Poincaré (cit. n. 4), p. xiv.
19. Ibid., p. vii. L'importance que donne Poincaré à la démonstration de de la possibilité d'une telle explication est révélatrice, à notre avis, d'une conception mécaniste chez lui. Nous reviendrons à ce sujet. Cf. les remarques de Bunge (cit.n. 17).
20. Ibid., p. xvi.
21. Ibid., p. xviii.
22. Ibid., p. vii.
23. Ibid., p. ix.
24. Bertrand J. "Les théories de Maxwell et la théorie électro-dynamique de la lumière", 1891.
25. Ibid., p. 743.
26. Ibid., p. 744.
27. Ibid., p. 745.
28. Nous voudrions rapporter ici, en passant, que la théorie électromagnétique de la lumière était connue des lycéens français dès 1891! Bertrand trouve en fait, scandaleux qu'une théorie aussi peu "rigoureuse" y soit enseignée: "Les idées de Maxwell sont enseignées dans nos lycées, et les candidats au baccalauréat, sans y rien comprendre absolument, doivent préparer pour le jour de l'épreuve une phrase ou deux sur la théorie électromagnétique de la lumière". Ibid., p.745.
29. Boussinesq J. Cours de Physique Mathématique de la Faculté des Sciences, tome I, 1901, p. xv. Voir aussi du même auteur: "Etude sur divers points de la philosophie des sciences" in Mémoires de philosophie scientifique (1879), pp. 60-61. Sur Boussinesq voir également le Dictionary of Scientific Biography; Todhunter and Pearson, A History of the Theory of Elasticity, from Galilei, Cambridge, (1886), p. 235 ; Glazebrook, Report on Optical Theories (1885).
30. Maxwell (cit. n. 14), vol. II, §574. En appuie de notre thèse voir notamment:
  - Moyer "Energy , Dynamics, Hidden Machinery ...", p. 267.
  - Klein "Mechanical explanation at the end of the Nineteenth Century, p. 69 .
31. Voir notamment Hamamdjian P. G. "Les concepts de métaphore scientifique et de système de métaphores scientifiques de Maxwell" particulièrement

rement la dernière section: "Les métaphores parfaitement analogues et les métaphores audacieuses".

32. L'évolution observée dans les Cours de Jamin témoigne de cette influence de Poincaré. Voir le chapitre III, section 2.
33. Ces théories ont fait l'objet des leçons de Poincaré à la Sorbonne de l'année 1887 / 1888. Elles ont été éditées en 1889 sous le titre Théorie Mathématique de la lumière.
34. Ibid. pp. iii-iv.
35. Ibid., p.i.
36. Poincaré (cit. n.4), p. 14.
37. Ibid., p. 33.
38. Ibid., p. 16.
39. Ibid., p. 23.
40. Ibid., p. 23.
41. Maxwell obtient l'expression valable pour le vide où  $k = 1$ . Cf. Treatise, § 100c, eq. 36.
42. Maxwell se limite à dire dans le Treatise que cette énergie "may be interpreted as the energy in the medium due to the distribution of **stress**", tout en signalant plus loin : "(...) but we have not in any way accounted for this stress, or explained how it is maintained" Cf. Treatise, § 110.
43. Poincaré (cit. n° 4), p. 31.
44. Ibid., p. 32.
45. Ibid., p. 33.
46. Ibid., p. 34.
47. Ibid., p. 36.
48. Poincaré parle systématiquement, dans ce chapitre, de "conducteurs". La théorie de Maxwell s'applique, cependant, à n'importe quelle distribution de charge, et non pas uniquement aux distributions superficielles des conducteurs.

49. Poincaré (cit. n° 4) p. 82. Cette affirmation de Poincaré peut être démontrée en utilisant les développements de Maxwell dans le Treatise. Soient deux systèmes électrisés E1 et E2, séparés par une surface équipotentielle  $V = C$ . Plaçons sur cette surface une distribution  $\sigma$  de charge telle que  $\sigma = R/4\pi$  où  $R$  est la force électromotrice sur un point de la surface due aux systèmes E1 et E2. Maintenant, on peut prouver que pour des points extérieurs à la surface, la distribution de potentiel ne change pas si l'on élimine le système qui est intérieur à la surface (disons E2) et on le remplace par cette distribution de charge. Les équations caractéristiques du potentiel sont satisfaites si l'on rend le potentiel égal, en tout point intérieur à la surface, au potentiel sur la surface. On peut également prouver que l'action mécanique de E1 sur E2 est identique à l'action mécanique de E1 sur la surface électrisée (supposée rigide). Comme la force électromotrice à l'intérieur de la surface est égale à zéro puisque le potentiel est constant, la force résultante sur un élément de surface  $dS$  est  $\frac{1}{2}R\sigma dS$ . Cette force peut être considérée comme une pression  $p$  qui agit sur l'élément de surface à partir de l'intérieur. Donc :

$$pdS = \frac{1}{2}R\sigma dS = 2\pi\sigma^2 dS .$$

On peut ainsi voir que si l'on double  $\sigma$  la force mécanique est quadruplée. Voir Treatise, 1e ed, 1e partie, ch. V.

50. Maxwell croyait que sa solution était la seule admissible. Dans la 3ème édition du Treatise, J.J. Thomson fait la même remarque que Poincaré (cf. Treatise, I, p. 165). Il ajoute que la solution proposée par Maxwell "is one that could not in general be produced by strains in an elastic solid". Mathieu et Brillouin sont arrivés à ce même résultat, comme nous avons signalé dans le chapitre IV.
51. Poincaré (cit. n°4), p. 88.
52. Ibid., p. 89.
53. Ibid., p. 92.
54. Gray, A. "Maxwell's Electro-magnetic theories", 1891, p. 296.
55. Maxwell (cit. n° 14), § 60.
56. Fitzgerald "M. Poincaré and Maxwell", 1892, p. 284.
57. Ibid., p. 284.
58. Ibid., pp. 284-5.
59. Ibid., p. 286.

60. Cf. Whittaker : A history of the theories of aether and electricity I, ch. IX, p. 292.  
Fitzgerald semble faire allusion à ce modèle dans le compte-rendu en question : "If the stresses are due to the connexions of the "fluide inducteur" there is no great difficulty in supposing them proportional to the squares of the displacements of the "fluide inducteur", just as the increased tension of a stretched horizontal string due to a small weight. In fact, a suggested model working upon this sort of principle has been published as illustrating this very point..."
61. Poincaré H. Leçons sur la Théorie Mathématique de la lumière, 1889, p.i.
62. Ibid., p.iii.
63. Fitzgerald "M. Poincaré and Maxwell", p. 287.
64. Brillouin fait référence ici sans doute à son "Essai sur les lois d'élasticité d'un milieu capable de transmettre des actions en raison inverse du carré de la distance" de 1887.
65. Brillouin M. "Compte rendu d'Electricité et Optique I et II" 1891, p. 131.
66. Maxwell (cit. N° 14), § 62, p. 70.  
Maxwell semble considérer cette théorie des diélectriques comme un cas d'une analogie physique entre phénomènes ayant des "natures très différentes", comme l'induction diélectrique, l'induction magnétique et la conduction électrique. Voir le dernier paragraphe de la page citée, qui a subi des modifications dans la deuxième édition.
67. Cf. Ibid., partie III, chap. IV et VI ; partie IV, chap. XI et XXII.
68. Nous verrons, dans le prochain chapitre, que Duhem et aussi J. Bromberg ont une interprétation radicalement différente de la nôtre.
69. Poincaré (cit. n°4), p. 12.
70. Il est toutefois vrai que Poincaré n'obtient pas dans le premier chapitre de Electricité et Optique (vol. I), la deuxième équation donnée par Maxwell dans le § 83a du Treatise, valable pour l'interface de deux milieux différents. C'est dans cette équation qu'inter-

viennent les notions de distribution "vraie" et "apparente" de charge. Mascart et Joubert obtiennent cette équation dans la première édition des Leçons, à partir d'un théorème sur la "réfraction" des tubes de force à l'interface de deux milieux ayant des pouvoirs inducteurs spécifiques différents.

71. Cf. Potier, note au § 83 du Traité d'Electricité et de Magnétisme (trad. française) de Maxwell. En ce qui concerne Mathieu, voir le chapitre IV, section 1.
72. Poincaré (cit. n°4), p. xvii.
73. Ibid., pp. xvii - xviii.
74. Voir notamment, Cazenobe, La Visée et l'Obstacle, p. 134.
75. Poincaré (cit. n° 4), p. 42.
76. Nous soulignons ici que Poincaré admet implicitement que la polarisation chez Maxwell peut être interprétée comme l'effet du déplacement d'un fluide positif. Voir le prochain chapitre sur les considérations de Duhem à ce sujet.
77. Poisson croyait que la forme de la cavité ne joue pas. Mathieu et Poincaré relèvent cette faute dans la théorie du magnétisme par influence élaborée par Poisson.
78. Maxwell dans la Partie III du Treatise considère le cas d'une cavité cylindrique pour calculer la force magnétique à l'intérieur d'un aimant. Cf. §§ 396 - 398.
79. Poincaré (cit. n° 4), p. 52.
80. Ibid.;, p. 60.
81. Ibid. p. 61
82. Ibid., p. 75.
83. Nous voudrions signaler ici également la série d'articles de P.H. Ledeboer, dans la revue Lumière Electrique de l'année 1899. L'auteur y expose la théorie de Helmholtz du "mouvement d'électricité", et aussi la théorie de Maxwell. Il admet qu'on peut obtenir la théorie de Maxwell à partir de la théorie de Helmholtz en posant  $K = 0$  dans l'expression proposée par ce dernier pour le potentiel électrodynamique.

84. Mathieu connaissait, toutefois, l'électrodynamique de Helmholtz comme nous l'avons signalé dans le chapitre IV, section 1.
85. Cf. Hertz : "Ueber die Beziehungen zwischen den Maxwell'schen electrodynamischen Grundgleichungen und den Grundgleichungen der gegnerischen Electro-dynamik", Wiedemann's Annalen, 23 (1884), p. 34.
86. Cf. Thomson J.J. "Report on electrical theories", 1885, Glazebrook R.T., Proc. Camb. Phil. Soc., 5 (1884) partie ii Glazebrook serait arrivé à des conditions de passage de la théorie de Helmholtz à la théorie de Maxwell analogues à celles que Poincaré posera. Voir à ce sujet Gray "Electrodynamic Theories and the Electromagnetic Theory of light", 1892. La thèse de Caze-nobe dans son ouvrage La Visée et l'Obstacle (p. 134), qui cherche la motivation de cette comparaison des deux théories dans l'expérience de Hertz de 1888, ne résiste donc pas à l'évidence historique.
87. Poincaré H. Electricité et Optique, vol. II, 1891, Préface.
88. Dans l'Appendice B nous avons respecté strictement les notations de Helmholtz, et comme lui nous avons utilisé les unités électrostatiques.
89. Poincaré (cit. n° 87), p. 56.
90. O'Rahilly préfère définir  $\lambda = \chi \alpha$  où  $\alpha$  peut prendre les valeurs 1 ou  $\Delta/c^2$  selon les unités choisies, et  $\chi$  est la constante diélectrique du milieu. Il affirme qu'il y a eu souvent une confusion entre ces deux significations implicites dans le paramètre  $\lambda$  (il l'appelle  $\alpha'$ ). Voir son ouvrage Electromagnetics, p. 71, p. 80 et suivantes.
91. L'utilisation d'unités électromagnétiques conduit à poser  $A = 1$  dans l'expression pour le potentiel électrodynamique (voir l'équation (4) de l'Appendice B). Si l'on utilise par contre des unités électrostatiques, comme Helmholtz, ce coefficient prendra la valeur  $A = \Delta/v^2$  où  $v$  est le rapport des deux unités de charge.

92. La table suivante indique la correspondance des notations employées dans chaque volume de Electricité et Optique :

vol. I	vol. II
$K_1$	$\lambda$
$h$	$e$
$(A, B, C)$	$(\xi, \eta, \zeta)$
$K$	$K$
$U = V + V_1$	$\lambda \varphi$
$\alpha_0$	$(\xi, \eta, \zeta)$

93. Dans le chap. III du vol. I Poincaré utilisait toutefois l'unité électrostatique de charge. Ici  $\lambda$  peut admettre soit l'unité électrostatique, soit l'unité électromagnétique.
94. Poincaré (cit. n° 37), p. 103.
95. Ibid., p. 93.
96. Poincaré n'utilise pas le terme "fictif". En l'utilisant nous voulons rapprocher ces développements de ceux analogues chez Mathieu et Duhem.
97. Poincaré considère ici le cas particulier d'un état permanent des courants et où il n'existe pas d'autres types de force électromotrice, à part celle d'origine électrostatique. Cela revient à annuler les deux derniers termes du membre droit de l'eq. (4).
98. Poincaré (cit. n° 4), ch. III, §§ 62 - 71.
99. Bruhnes, dans son analyse du deuxième volume de Electricité et Optique, renforce l'importance que nous avons donné aux considérations de Poincaré dans le chap. III du vol. I de cet ouvrage : "On ne peut donc faire rentrer la théorie de Maxwell dans celle de Helmholtz par des considérations ou par des hypothèses particulières qui soient purement électrodynamiques. Il faudra avoir recours à des considérations électrostatiques, se demander quelle est la nature de la polarisation d'un diélectrique dans les idées anciennes et dans les idées de Maxwell, et voir si l'on peut faire rentrer l'électrostatique de Maxwell dans l'électrostatique ancienne. Si on y réussit, on aura du même coup concilié deux théories électrodynamiques qui n'ont entre elles, comme nous l'avons montré, qu'une différence d'ordre électrostatique." (Voir B. Bruhnes, "Sur la différence entre l'Electrodynamique de Helmholtz et celle de Maxwell", 1891).

100. Nous ne pouvons donc pas souscrire aux analyses de Cazenobé dans La visée et l'obstacle, pp. 136-139. Contrairement à la thèse soutenue dans cet ouvrage, Poincaré n'est pas concerné, dans le vol. II, par la "signification physique" de  $\lambda$ , ni par la "conception de la réalité" traduite par chaque théorie. Nous signalons également que le premier paragraphe de la p. 138 de cet ouvrage ne peut pas être retenu. Cazenobé confond la condition qui caractérise la théorie de Poisson-Mossotti, avec celle que permet de faire le passage de la théorie de Helmholtz à la théorie de Maxwell. Contrairement à ce qui ressort de ce paragraphe, la théorie de Helmholtz est capable de rendre compte de la propagation de perturbations transversales dans le vide, comme nous verrons par la suite.
101. Poincaré (cit. n. 87), p. 104.
102. Cette différence est essentielle chez Brillouin. Voir, plus bas, note 104.
103. Il y a aussi la prévision d'une "perturbation électrostatique" associée à l'éq. (20), que Poincaré ne signale pas.
104. Poincaré (cit. n. 87) p. 111. Cette conséquence de la théorie de Maxwell ne semble pas poser problème pour Poincaré. Pourtant elle sera considérée par d'autres savants comme une objection majeure et une raison pour préférer la théorie de Helmholtz à la théorie de Maxwell. Brillouin, dans son compte-rendu de l'ouvrage de Poincaré, affirme à ce propos: "... si nous traitons les éqs. (I) [éqs. (17')] dans notre texte], non pas comme approchées, mais comme rigoureuses, et si nous conservons à  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , sa signification de flux d'électricité statique, toutes les forces électrostatiques disparaissent du même coup, puisque aucune charge d'électricité ne peut varier nulle part..." (p.134). Il continue plus loin: "... nous avons perdu l'électrostatique en route; d'ailleurs, nous aboutissons à une vitesse de propagation nulle d'un certain genre de perturbations, c'est-à-dire à un état déjà instable du milieu". Brillouin fait ici référence à la propagation du potentiel électrostatique, prévue par la théorie de Helmholtz mais non par la théorie de Maxwell. C'est une raison, pour lui, de préférer la première: "Il est donc impossible d'admettre comme rigoureuses les conventions de Maxwell; il faut, ou les remplacer par d'autres, toutes différentes, mais conduisant à la même analogie avec la lumière (nous n'y saurions plus renoncer), ou tout au moins ne plus les traiter que comme approchées, correspondant à un état limite presque atteint, mais pas tout à fait. Ce dernier point de vue nous conduit tout naturellement aux recherches de Helmholtz". Brillouin fait ici référence à la condition  $\lambda \rightarrow 0$  qui permet de retrouver les résultats de la théorie de Maxwell d'une façon approchée et non pas rigoureuse. (voir son Compte Rendu de l'ouvrage Electricité et Optique dans le Bulletin des Sciences Mathématiques et astronomiques, 2<sup>e</sup> série, 15 (1891) pp. 133-137.) Duhem va contourner le problème en interprétant  $\rho$  dans l'égalité (21) non pas comme une densité vraie d'électricité, mais comme une densité fictive (voir Les théories Electriques de J. C. Maxwell, p. 123). Voir aussi le prochain chapitre pour sa justification de cette interprétation.

105. Poincaré (cit. n. 37), p. 111.
106. Nous rappelons que le symbole  $\mathcal{E}$  ne désigne pas la même grandeur chez Helmholtz et chez Poincaré. (cf. Appendice B).
107. Poincaré (cit. n. 37), p. 112.
108. Ibid., p. 1.
109. Ibid., p. vii.
110. Poincaré semble, cependant, rejeter les conséquences de la théorie de Helmholtz pour la réflexion métallique. Voir Elect. et Opt. vol. II, p. 217. La théorie de Maxwell, toutefois, ne semble pas se porter mieux (voir les considérations de la note II ajoutée à la publication de cet ouvrage).
111. Ibid., Conclusions au vol. II.
112. Ibid., p. 114.
113. Hertz (cit. n. 35). Poincaré affirme que cette comparaison des théories de Maxwell et de Helmholtz a "guidé" Hertz dans sa série d'expériences sur les oscillations électriques. Pour une thèse contraire voir Caze-nobe, La Visée et l'Obstacle, p. 159-162.
114. Cf. Poincaré La Science et l'Hypothèse, ch. IX: "Les hypothèses en Physique", p. 178.
115. Hertz n'utilise pas la grandeur "déplacement électrique" mais, plutôt, la force électrique. De cette façon la symétrie entre les équations (I) et (II) ressort encore plus nettement.
116. Un "feuillet magnétique" est une double couche de "matière électrique" australe et boréale, respectivement, distribuée sur une surface donnée et ayant une épaisseur donnée (séparation entre les couches). La "puissance" d'un feuillet est donnée par le produit de l'intensité de magnétisation par l'épaisseur du feuillet.
117. Poincaré (cit. n. 37), p. 122.
118. Ibid. p. 123.
119. Ibid., p. 127. Voir également Gray, "Electrodynanic Theories and the Electromagnetic Theory of Light", p. 371.
120. Ibid., p. 126. Bruhnes, dans l'article "Heinrich Hertz et son oeuvre" (1894), affirme que la symétrie des équations pour la force électrique et pour la force magnétique est "l'idée capitale de Maxwell". Il fait écho aux propos de Poincaré en affirmant que "... ce qui distingue

Maxwell de ses prédécesseurs, c'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."

121. Poincaré (cit. n. 87), Note 1: "La Théorie de Helmholtz et le Principe de Newton", p. 221.
122. Poincaré H. "A Pronos des expériences de M. Cremieu", 1901, notamment les pages 994-998. Dans cet article il n'est plus question, toutefois, du "principe de l'unité de la force électrique". Brillouin dans son ouvrage Propagation de l'Electricité (1904) signale en effet que les résultats négatifs des expériences de Cremieu, considérés comme suffisamment confirmés par lui (l'ouvrage a été écrit en 1903, avant que ces résultats soient contestés), conduisent au rejet de ce principe. Cf. § 298.
123. Poincaré H. Les Oscillations Electriques, 1894.
124. Hertz, "On the fundamental equations of electromagnetics for bodies at rest" in Electric Waves, p. 196.
125. Poincaré, (cit. n. 123), p. 2.
126. Ce recueil a été traduit en anglais en 1893 avec le titre Electric Waves.
127. Poincaré, (cit. n. 125) pp. 4-5.
128. A la fin de l'ouvrage Les Oscillations Electriques Poincaré fait également une étude du mémoire de Hertz: "On the fundamental equations of electromagnetics for bodies in motion" (1890), in Hertz Electric Waves, article 13 .
129. Poincaré H. "A propos de la théorie de M. Larmor", L'Eclairage Electrique, 3(1895) p. 5-3, 298-295; 5(1895) p. 5-14, 385-392. Cette série d'articles a été reprise dans la deuxième édition de l'ouvrage Electricité et Optique, 1901. Nous allons nous référer, par la suite, à cette réimpression.
130. Ibid., p. 580.
131. Ibid., p. 582.
132. Ibid., p. 583.
133. Ibid., p. 584.
134. Ibid., p. 592.
135. Ibid., p. 599.

136. Ibid., p. 599.
137. Ibid., p. 602.
138. Ibid., p. 611.
139. Ibid., p. 612.
140. Ibid., p. 613.
141. Cf. Hiroshige T. "The ether problem...", p. 68.
142. Voir note 1.
143. Nous nous permettons ici de fournir une évidence supplémentaire de l'"empirisme" de Poincaré, où, si l'on veut, de l'importance qu'il assignait à l'expérience en tant qu'une "instance" privilégiée de jugement d'une théorie physique. En 1901, quand il discutait les résultats de l'expérience de Crémieu, Poincaré se montrait prêt à abandonner "l'édifice de l'Electrodynamique", et revenir aux doctrines classiques, au cas où ces résultats venaient à être confirmés : "Supposons qu'à la suite de ces expériences les idées de M. Crémieu viennent à triompher ; sera-ce là une solution définitive ? Non, la difficulté ne fera que commencer. Sur les ruines des anciennes théories, il faudra rebâtir (...) Va-t-on être obligé de revenir à l'hypothèse des courants ouverts, et dans ce cas ne va-t-on pas se trouver aux prises avec les complications inextricables des théories abandonnées, d'Ampère et de Helmholtz ?" Poincaré "A propos des expériences de M. Crémieu", pp. 1003/4. Les résultats auxquels Crémieu était parvenu dans ses expériences étaient faussés, et ils ont été corrigés par la suite. L'article de Poincaré de 1901 a été reproduit dans l'ouvrage "La science et l'hypothèse", Ch. XIII, mais sans la partie consacrée à la discussion des expériences de Crémieu, d'où nous avons extrait le passage ci-dessus.
144. Goldberg S. "Henri Poincaré and Einstein's theory of Relativity", p. 944.

145. Cf. Miller, "A study of Poincaré's 'Sur la dynamique de l'électron'" notamment l'Introduction et la section 5. Lakatos et Popper caractérisent le "conventionalisme" comme la doctrine qui attribue une nature conventionnelle aux théories de la physique ou à certaines des propositions qui composent ces théories. D'après cette doctrine il est possible et légitime d'éliminer une contradiction entre une "théorie" et un "résultat expérimental", par des modifications adéquates apportées à cette théorie. Nous ne prétendons pas discuter si ces deux philosophes sont fidèles aux épistémologies de Poincaré et de Duhem quand ils qualifient ces épistémologies de "conventionalistes". Nous essayerons simplement de clarifier notre usage du terme "conventionaliste" dans ce travail appliqué aux doctrines des deux savants français. Poincaré applique initialement le terme de "conventions" aux axiomes de la géométrie euclidienne : "Les axiomes géométriques ne sont donc ni des jugements synthétiques "à priori" ni des faits expérimentaux. Ce sont des conventions..." (La Science et l'Hypothèse, p. 66). Nous sommes cependant intéressés surtout à son usage de cette notion pour désigner certains des "principes" de la Mécanique Classique, qui reposent à l'origine sur l'expérience, mais qui ne peuvent pas être "infirmées" par l'expérience. Les "principes" de Newton, celui de la conservation de l'énergie ou celui du mouvement relatif sont considérés comme des "conventions" adoptées par un souci de "simplicité". (La Science et l'Hypothèse, troisième partie, ch. VI). Poincaré établit une différence entre la "Mécanique" et les "Sciences physiques". Dans ces dernières, certaines des hypothèses utilisées peuvent être infirmées par l'expérience. Il propose ainsi une classification des "hypothèses des physiques", selon leur "vulnérabilité" aux infirmations expérimentales. Certaines hypothèses ont pour lui un caractère si "naturel" qu'elles sont les dernières que l'on doit abandonner". Dans une seconde catégorie il range les "hypothèses indifférentes" - comme l'hypothèse de l'existence d'atomes - qui sont simplement "utiles", et sur lesquelles l'expérience ne peut porter aucun jugement. La troisième catégorie d'hypothèses sont les "véritables généralisations" qui peuvent être "confirmées ou infirmées" par l'expérience". (Ibid., pp. 180-1). Dans notre texte nous utilisons le terme "conventionalisme" pour caractériser, surtout, certaines tentatives chez Poincaré d'accorder les conséquences de deux théories différentes, en introduisant des modifications dans certaines hypothèses d'une des théories. Ces hypothèses considérées comme "indifférentes" posent, en général, une certaine ontologie comme fondement de la théorie. Pour le "conventionalisme" de Duhem, voir le chapitre VI, notamment la dernière section.
146. Poincaré (cit. n.4), §226.
147. Cf. Miller (cit. n. 146), p. 239. Miller caractérise la physique de Poincaré comme une "physique de principes".

## NOTES DU CHAPITRE VI

1. Duhem, P. "Quelques réflexions au sujet des théories physiques", 1892, p. 153.
2. Ibid., p. 154.
3. Ibid., p. 155.
4. Ibid., p. 156.
5. Ibid., p. 166.
6. Ibid., p. 169.
7. Ibid., p. 168.
8. Ibid., p. 173.
9. Duhem P. "Les théories de l'optique", 1894, p. 112.
10. Dans l'article de 1892, que nous avons considéré auparavant, cette idée est absente. Duhem semble être beaucoup plus "falsificationniste", si nous nous permettons d'utiliser ce concept un peu anachronique. Dans la page 167 de cet article, par exemple, Duhem affirme que si les conséquences d'une théorie physique sont en désaccord avec une "loi expérimentale (...) la théorie doit être rejetée, ou, tout au moins, on doit restreindre l'étendue de la classe de lois qu'elle prétendait embrasser". L'idée qu'une modification de la théorie elle-même peut éliminer la contradiction avec l'expérience semble être absente.
11. Voir Lamé G. Leçons sur l'élasticité des corps solides, 1852, pp. 334-335.
12. Voir notamment, Boussinesq J. "Théorie nouvelle des ondes lumineuses", 1868.
13. Duhem P. (cit. n. 9), p. 117.
14. Ibid., p. 117.
15. Ibid., pp. 118-119.
16. Ibid., p. 119.
17. Ibid., p. 120.
18. Ibid., p. 121.

19. Ici Duhem vise, sûrement, le chapitre sur la théorie électromagnétique de la lumière de l'ouvrage Electricité et Optique de Poincaré.
20. Duhem P., (cit.n. 9), p. 121.
21. Ibid., p. 122.
22. Ibid., p. 124.
23. Ibid., p. 125.
24. Ibid., p. 125.
25. Duhem s'est vraisemblablement inspiré d'une dichotomie analogue existante chez Pascal.
26. Duhem P. "L'école anglaise et les théories physiques", 1893, p. 353.
27. Duhem P. La théorie Physique, son objet et sa structure, 1906, 3<sup>e</sup>ed., 1981, p.101.
28. Ibid., p. 101.
29. Ibid., p. 102.
30. Ibid., p. 115.
31. Ibid., p. 104.
32. Duhem P. (cit. n. 26), p. 352.
33. Ibid., p. 353.
34. Ibid., p. 353.
35. Ibid., p. 359.
36. Ibid., p. 358.
37. Duhem P. (cit. n. 27), p. 113.
38. Ibid., p. 116.
39. Duhem P. (cit. n. 26), p. 359.
40. Duhem P. (cit. n. 27), p. 125
41. Ibid., p. 115.
42. Ibid., p. 140.

43. Ibid., p. 142.
44. Ibid., p. 143.
45. Voir à ce sujet les articles:  
 -Bunge M. "Lagrangian formulation and mechanical interpretation";  
 -Klein M. J. "Mechanical explanation at the end of the nineteenth century";  
 -Moyer D. F. "Energy, Dynamics, Hidden Machinery: Rankine, Thomson and Tait, Maxwell";  
 -Smith "A new chart for British Natural Philosophy: the development of energy physics in the Nineteenth Century";  
 -Turner J. "Maxwell and the logic of dynamical explanation".
46. La seule controverse importante autour de la conception d'action contiguë chez Maxwell, que nous avons pu trouver au cours de nos recherches, est celle soulevée par Bertrand. Nous l'avons exposée et discutée dans le chapitre II.
47. Cette thèse est soutenue dans une article remarquable de Kargon R. "Model and Analogy in Victorian Science: Maxwell's critic of the French Physicists".
48. Maxwell J. C. "On Faraday's lines of force", 1855-1856, p. 156.
49. Ibid., p. 156.
50. Ibid., p. 159.
51. Maxwell J. C. "On physical lines of force", 1861-1862, p. 486.
52. Dans la dernière partie du son mémoire il ne considère que les phénomènes électrostatiques. Il n'y a plus de champ magnétique et, en conséquence, plus de mouvement tourbillonnaire. Les "vortices" deviennent alors des "cellules" donnée d'elasticité.
53. Moyer D. F. (cit. n. 45), p. 267.
54. Pour l'usage du terme "conventionalisme", voir la note 145, du ch.V .
55. Poincaré, en fait, admet non pas des contradictions internes à une théorie, mais des contradictions eventuelles entre diverses théories concernant un même domaine de phénomènes. C'est le cas pour le Treatise. Duhem brouille un peu, il nous semble, ces deux aspects.
56. Duhem P. L'évolution de la Mécanique , 1903, p. 128.
57. Ibid., p. 180.
58. Ibid., p. 181.

59. Ibid., p. 181.
60. Ibid., p. 183.
61. Duhem fait référence ici à l'ouvrage posthume de Hertz, Die Principen der Mechanik in neuem zusammenhang Dargestellt, 1894; trad. anglaise de 1899.
62. Ibid., p. 184.
63. Ibid., p. 186.
64. Ibid., p. 54.
65. Cf. note 61.
66. Duhem P. (cit. n. 56), p. 160.
67. Ibid., p. 161.
68. Duhem P. " Sur la théorie de l'induction électro dynamique", 1885, p. 44.
69. Duhem P. Leçons sur l'électricité et le magnétisme, tome I, p. vi.
70. Ibid., tome II, p. 449.
71. Ibid., tome II, p. 455.
72. cf. Maxwell, Treatise on electricity and magnetism, § 110.
73. Duhem P. (cit. n. 69), tome II, p. 456.
74. Ibid., tome II, p. 457.
75. Duhem P. Notice sur les titres et travaux scientifiques, 1913, o. 92.
76. Duhem (cit. n. 69), tome III, p. 178, note 2. Il fait référence ici aux ouvrages, dans l'ordre de citation: Maxwell, Treatise, trad. française, tome II, p. 557.; Mascart, Leçons sur l'Electricité et le Magnétisme, tome I, p. 685. et Jamin, Cours de Physique, tome IV, fasc.2, p. 455.
77. Helmholtz, "Ueber de Theorie der Elektrodynamik" (1872) in Wissenschaftliche Abhandlungen , vol. I , p.637
78. Duhem P. "Les actions électrodynamiques et électromagnétiques", 1893.
79. Duhem P. "Sur l'électrodynamique des milieux diélectriques", 1896. Ces deux mémoires ont été écrits en 1894.

80. Dans l'ouvrage Les Théories Electriques de J.C. Maxwell, Duhem essayera d'étayer cette thèse historiographique. Voir la section suivante.
81. Le produit  $\epsilon K$  designe la même grandeur que  $\gamma$  chez Mathieu, c'est-à-dire, le coefficient de polarisation du milieu.
82. Duhem P. "Quelques remarques au sujet de l'électrodynamique des corps diélectriques proposée par J.C. Maxwell", 1894, §II.
83. L'idée de Faraday serait même, d'après Duhem, en "contradiction" avec celle de Maxwell exprimée dans le mémoire PH, étant donné le signe négatif dont est affectée l'équation entre la force électromotrice et le déplacement électrique. Cette contradiction aurait été levée à partir du mémoire DT, où Maxwell change le signe de cette équation. Duhem fait cependant état d'autres "fautes de signe" commises par Maxwell dans ce dernier mémoire, qui seraient autant d'évidences du changement signalé. Dans son ouvrage Les Théories Electriques de J.C. Maxwell, Duhem recencera et analysera ces changements pour l'en semble des écrits de Maxwell. Nous voyons donc ici déjà, la présence de quelques uns des thèmes qui seront au coeur de l'ouvrage de 1902.
84. Duhem (cit. n.82), § II.
85. Il y a une faute dans le texte de Duhem (p.253). Il écrit à la place de l'éq. (11), l'équation:  $\gamma = Q/q \cdot C$ . Les développements qui suivent dans son texte utilisent, cependant, la relation correcte.
86. Duhem démontre que si l'on admet pour le potentiel d'un système comprenant des conducteurs et des diélectriques l'expression:

$$V = \frac{\epsilon}{2} \int \left( A \frac{dV}{dx} + B \frac{dV}{dy} + \frac{dV}{dz} \right) d\sigma$$

— où  $V$  est le potentiel de polarisation (donc associé aux distributions fictives de charge), et l'intégrale s'étend sur le volume occupé par les diélectriques — la force électrostatique de Coulomb sera:

$$F = \epsilon \frac{q q'}{r^2},$$

où  $q$  et  $q'$  sont des charges fictives. Or, cette force ne dépend pas de  $K$ , qui caractérise la nature du diélectrique.

87. Duhem signale que l'expérience imposerait la condition  $K < 0$ , mais que dans les écrits de Maxwell elle n'est pas toujours vérifiée. Elle serait admise dans les mémoires PH, mais pas dans les autres écrits de Maxwell. (voir notre analyse de l'ouvrage Les Théories Electriques de Maxwell).

88. Duhem fait ici abstraction du facteur qui se rapporte à la perméabilité magnétique du milieu. Voir éqs. (33) et (34) de l'Appendice B.
89. Le paramètre  $\lambda$  de Duhem correspond au  $K$  de Helmholtz. Le  $K$  de Duhem a la signification donnée plus haut: C'est le coefficient de polarisation du milieu.
90. Duhem fait ici, de toute évidence, référence aux expériences de Weber et Kohlrausch de détermination du rapport entre les unités électrodynamiques et électrostatiques de charge.
91. Duhem (cit. n.82), p.259.
92. Il y a une faute dans le texte au début du § VIII. Duhem se réfère sûrement à la "première loi" de Maxwell et non pas à la "deuxième loi" comme dans le texte. Il suffit de regarder la conclusion de la section antérieure.
93. Cf. Poincaré Electricité et Optique, vol. I, p.34. Duhem cite cette même page.
94. Duhem (cit. n.82), p.264.
95. Hertz Electric Waves, Introduction, p.26.
96. Ibid., p.27.
97. Duhem (cit. n.82), p.266.
98. Ibid., p.267.
99. Ibid., p.268.
100. Ibid., p.269.
101. Duhem "Sur l'interprétation des expériences de Hertz", 1895.
102. Pour les premières Duhem pose, comme Helmholtz l'expression:

$$- \frac{A^2}{2} \sum \left( \frac{1+\lambda}{2r} \cos \omega + \frac{1-\lambda}{2r} \cos \theta \cos \theta' \right) j_j j'_j ds ds'$$

Les courants de déplacement (supposés avoir lieu dans des "fils diélectriques") admettent la même expression pour le potentiel mais avec un coefficient  $C$  à la place du coefficient  $A$ .

103. Duhem utilisera ici  $C$  à la place du produit  $\theta A$  des éqs. (34) et (35).

104. La grandeur ( $1 + 4\pi f$ ) est la permeabilité magnétique du milieu.
105. Il s'agit de toute évidence de l'expérience de Blondlot rapportée dans la note "Détermination de la vitesse de propagation d'une perturbation électrique le long d'un fil de cuivre à l'aide d'une méthode indépendante de toute théorie" - CR, 117 (1893), pp.543 et 678. Voir aussi à ce sujet O'Rahilly, Electromagnetics, p.170.
106. Duhem (cit. n.101), p.496.
107. Ibid., p.501.
108. Duhem "Sur la propagation des actions électrodynamiques ", 1896, p. B-1. Duhem fait, nous semble-t-il, référence à la théorie de l'électron de Lorentz quand il parle, dans ce passage, de "doctrines nouvelles".
109. Ibid., p. B-2.
110. Ibid., p. B-3.
111. Ibid., p. B-82.
112. Nous avons commenté cette article dans la première partie de ce chapitre.
113. Les objections à la théorie électromagnétique de la lumière faites par des scientifiques comme W. Thomson étaient motivées par un parti pris mécaniste dans l'explication des phénomènes physiques. Mais ce savant ne repoussait pas, à priori, une théorie électromagnétique de la lumière.
114. Lorentz, H. A., "Sur la Théorie de la Réflexion et de la Réfraction de la Lumière", 1875, in Collected Papers, vol. 1.
115. En particulier Maxwell le cite dans son article "Ether" pour la neuvième édition de l'Encyclopædia Britannica. Reedité dans ses Collected Papers, vol. II, p. 772, note.
116. Cf. Hirosige, "Origins of Lorentz's Theory of Electrons", p.170.
117. Ibid. pp.171-2.
118. Voir p. ex. p. B-34 et suivantes de l'article de 1896. Duhem se refuse également à accorder une autonomie au "champ" par rapport à la matière, une idée qu'il attribue à la "doctrine du Transport de l'Energie" (voir le chapitre III-3 où il fait référence aux recherches de Poynting). Un autre aspect que nous voulons souligner est le fait que Duhem associe, dans cet article, les termes d'onde "électromagnétique" et "électrostatique", aux ondes transversale et longitudinale respectivement, prévues par la théorie de Helmholtz. Il remarque, cependant, que "ces mots n'ont d'autre sens que celui d'une notation".(p.B-64).

119. L. Roy met en évidence ce même "tournant" chez Duhem, sans en fournir une explication. Voir de cet auteur L'électrodynamique des milieux isotropes en repos d'après Helmholtz et Duhem, 1923, p.9.
120. Duhem "Sur la théorie électrodynamique de Helmholtz et la théorie électromagnétique de la lumière", 1901, p.229.
121. Duhem (cit. n.108), Note additionnelle.
122. F maintenant désigne le  $K$  des articles antérieurs, c'est à dire le coefficient de polarisation diélectrique. Le produit  $\epsilon F$  correspond à ce que Helmholtz désigne par  $\epsilon$  dans son mémoire de 1870 (voir Appendice B).
123. Maintenant Duhem adopte la même notation de Helmholtz. Avant il utilisait  $\lambda$  pour désigner ce paramètre de l'expression du potentiel électrodynamique de Helmholtz. Voir par exemple note 102, plus haut.
124. Voir à ce sujet la discussion en O'Rahilly, Electromagnetics, p.170.
125. Duhem (cit. n.120), p.170.
126. Ibid., p.235. Duhem remarque que son traitement du sujet est plus général que celui de Helmholtz ou de Lorentz parce qu'il n'introduit l'hypothèse de Faraday-Mossotti qu'à la fin du raisonnement, et non au début comme ces deux savants. Duhem fait ici référence sûrement à la thèse de doctorat de Lorentz de 1875 où ce dernier applique la théorie de Helmholtz à l'étude de plusieurs phénomènes optiques, dont la réflexion et la réfraction de la lumière. A cette époque Lorentz considérait déjà la théorie électromagnétique de la lumière comme un acquis définitif, mais il a adopté le point de vue de la théorie de Helmholtz (il s'est converti à l'approche de Maxwell seulement vers 1891). Lorentz a utilisé dans sa thèse l'hypothèse de Faraday-Mossotti pour éliminer l'onde longitudinale que prévoyait la théorie de Helmholtz. Seulement de cette façon il arrive à résoudre le problème de la réflexion et de la réfraction de la lumière. Cf. Hirose, "Origins of Lorentz's Theory of Electrons", pp. 160-172, notamment p. 170.
127. Duhem "Sur l'analogie entre les rayons X et les oscillations hertziennes", 1902.
128. Duhem Notice sur les Titres et Travaux Scientifiques, p.105.
129. Duhem "Sur l'hypothèse de Faraday et de Mossotti, et sur certaines conditions vérifiées au contact de deux diélectriques", 1916.
130. Ibid., p.410.
131. Duhem Notice sur les Titres et Travaux Scientifiques, 1913, p.105.
132. Duhem Les Théories Electriques de J.C. Maxwell, étude historique et critique, 1902, p.15.

133. Ibid., p.14.
134. Ibid., p.55.
135. Ibid., p.56. Duhem fait ici référence aux analogies qui établit Maxwell entre certains phénomènes électriques et magnétiques et la théorie du mouvement d'un fluide incompressible (mémoire FA).
136. Ibid., p.53.
137. Duhem semble ici faire référence à certaines équations auxquelles parvient Maxwell dans sa théorie du mouvement d'un fluide incompressible. Voir mémoire FA, p.177, l'équation pour le "potentiel total du système".
138. Maxwell, mémoire FA, p.159.
139. Maxwell, mémoire PH, p. 491
140. Duhem (cit. n. 131), p. 61
141. Cf. Duhem (cit. n.132), p.37.
142. Ibid., p.66.
143. Maxwell, mémoire DT, p.651. Bromberg est du même avis que Duhem. Selon lui, l'équation (G) exprime le fait que "la charge est la manifestation du processus de polarisation diélectrique". Cf. Bromberg J. "Maxwell's Electrostatics", p.146.
144. Maxwell, mémoire PH, partie III: "The Theory of Molecular Vortices applied to Statical Electricity", 1862.
145. Ibid., p.497.
146. La signification de la grandeur (p, q, r,) de la prop. XIV du mémoire PH est, en fait, ambiguë. Elle désigne tantôt le courant de conduction uniquement, tantôt le courant total (courant de conduction + courant de déplacement). Voir, plus bas, notre discussion à ce sujet.
147. Duhem (cit. n. 132), p.87.
148. Cf. Duhem (cit. n.82).
149. Maxwell (cit. n.140), p.491. Cette équation est valable pour l'axe coordonné "z".
150. Ibid., p.495. La faute a lieu dans le passage de l'éq. (100) à l'éq. (104) de ce mémoire.
151. Ibid., p.491. Bromberg aussi attribue à cette équation un statut phénoménologique. Voir de cet auteur (cit. n.143), p.144.

152. Cf. aussi Bromberg (cit. n.143), p.221.
153. Maxwell (cit. n.143), p.560, éq. E.
154. Le coefficient K n'aura plus, dans ce mémoire, une signification mécanique puisque Maxwell ne fait plus appel à un mécanisme.
155. Duhem (cit. n.132), p.91.
156. Typiques de cette dernière appréciation sont les considérations de Duhem au sujet de la théorie des condensateurs du mémoire DT. Cf. Ibid., pp.85-6.
157. Ibid., p.97.
158. Dans les mémoires PH et DT Maxwell n'écrit pas une équation valable pour les surfaces de discontinuité entre deux milieux différents. Duhem va, néanmoins, la supposer dans les développements qui suivent. Il écrira, alors, à côté de l'éq. (1) du mémoire DT, l'équation :

$$E + f_1 \cos(N_1, x) + g_1 \cos(N_1, y) + h_1 \cos(N_1, z) + \\ + f_2 \cos(N_2, x) + g_2 \cos(N_2, y) + h_2 \cos(N_2, z) = 0$$

où 1 et 2 désignent deux milieux diélectriques différents; E désigne la densité superficielle de charge "fictive"; N désigne la normale dirigée vers l'intérieur du milieu. A partir de la 3<sup>e</sup> électrostatique Duhem suppose un changement de signe dans cette équation (analogue à celui que subit l'éq. (1)). Il écrira alors, comme Maxwell plus tard (Cf. Treatise, vol. I, § 83a, éq. 2) :

$$E = f_1 \cos(N_1, x) + g_1 \cos(N_1, y) + h_1 \cos(N_1, z) + \\ + f_2 \cos(N_2, x) + g_2 \cos(N_2, y) + h_2 \cos(N_2, z) ,$$

à côté de l'éq. (7) de notre texte.

159. Duhem n'utilise pas, bien sûr, la notation vectorielle qu'il désavoue d'ailleurs explicitement.
160. Duhem (cit. n.132), p.96.
161. Cf. Treatise, vol.I, § 68. Maxwell introduit un facteur  $1/4\pi$ , et la relation est écrite en langage de quaternions (l'origine du langage vectoriel):

$$\vec{D} = \frac{1}{4\pi} K \vec{F}$$

162. Ibid., vol. II, §612, éq. (J). Dans le mémoire NO cette équation n'est pas donnée explicitement. Elle peut, cependant, traduire le contenu d'un théorème C de ce mémoire (in Collected Papers, p.139).
163. Duhem (cit. n.132), p.99.
164. Ibid., p.101.
165. Cf. Hertz Electric Waves, p.27.
166. Bromberg J. "Maxwell's Displacement Current and his Theory of Light".
167. Ces deux parties correspondent, respectivement, aux Pros. XII et XIII pour la partie mécanique et à la Prop. XIV pour la partie électrique. Cf. Maxwell (cit. n.140).
168. Bromberg (cit. n.166), p.227.
169. Bromberg (cit. n.143), p.145.
170. Ibid., p.142.
171. Ibid., p.151. Bromberg n'a pas compris la position de Duhem qui, en fait, est identique à la sienne, contrairement à ce qu'elle pense.
172. Ibid., p.146.
173. Bromberg compare l'éq. (1) du mémoire DT avec l'équation pour la polarisation magnétique du Treatise (vol. II, §§ 385/6) pour fonder cette thèse.
174. Bromberg (cit. n.143), p.151.
175. Everitt "Maxwell, James Clerk", p.217.
176. Duhem (cit. n.132), p.107.
177. Ibid. p.108.
178. Il est à remarquer que Duhem ne fait référence nulle part au fait que Helmholtz, dans son mémoire de 1870, introduit une hypothèse analogue à celle de Maxwell et dans **les mêmes circonstances** puisqu'il n'y avait pas non plus, à ce moment là, une donnée expérimentale nouvelle qui l'obligeait à le faire. Le but de Helmholtz, d'ailleurs, n'était pas celui de rendre compte des "faits expérimentaux" mais plutôt celui d'arriver à des résultats similaires à ceux obtenus par Maxwell dans le mémoire DT. Pourquoi Duhem n'applique-t-il pas le même jugement à la théorie de Helmholtz ? Nous pouvons supposer que Duhem nuance sa critique par moyen d'"explications historiques", parce qu'elles s'appliquent aussi et surtout à la démarche théorique de Helmholtz. (Voir Appendice B).

179. Duhem (cit. n.132), p.110.
180. Ibid., p.111.
181. Ibid., p.113.
182. Duhem cite, pour appuyer cette thèse, la pag. 496 du mémoire PH. Cf. éq. (13) plus bas.
183. Duhem (cit. n.132), p. 116.
184. Maxwell désigne ces grandeurs respectivement par  $(p, q, r)$  et  $(\frac{d\mathfrak{f}}{dt}, \frac{d\mathfrak{g}}{dt}, \frac{d\mathfrak{h}}{dt})$  dans le mémoire DT;  $(p', q', r')$  désigne dans ce mémoire le courant total.
185. Maxwell ne considère pas des surfaces de discontinuité avant le Treatise. Les discussions qui vont suivre concernent donc surtout l'éq. (8).
186. Duhem (cit. n.132), p.121.
187. Ibid., p.116.
188. Brillouin fait cette même objection à la théorie de Maxwell. Voir son Compte-Rendu de l'ouvrage Electricité et Optique.
189. Maxwell (cit. n.140), p.462.
190. Duhem (cit. n.132), p.118.
191. Il a déjà été question de cette équation plus haut. Voir les commentaires de l'éq. (4).
192. Duhem (cit. n.132), p.119.
193. Maxwell (cit. n.143), p.554, éq. (A).
194. Ibid., p.557, éq. (C).
195. Ibid., p.561, éq. (H).
196. Duhem (cit. n.132), p.119.
197. Bromberg (cit. n.166).
198. Ibid., p.222.
199. Ibid., p.223.
200. Duhem (cit. n.132), p.119.

201. Duhem (cit. n.132), p.138.
202. Ibid., p.221.
203. Nous signalons que Duhem parvient tardivement à cette reconnaissance, comme il se dégage des sections précédentes.
204. Duhem, (cit. n.132), p.223.
205. Boltzmann Vorlesungen über Maxwell's Theorie der Elektrizität und des Lichtes, 1891/1893.
206. Duhem (cit. n.132), p.225.
207. Duhem (cit. n.131), p.112.
208. Ibid., p.107.
209. Ibid., p.105.
210. Duhem, Traité d'Energetique ou de Thermodynamique générale, Paris, 1911, Tome I, p.5.
211. Duhem "Réflexions sur la Science Allemande", 1915, p.668.
212. Nous signalons ici, cependant, un passage où Duhem affirme que la "comparaison" entre une théorie et une expérience peut conduire à abandonner la première:
- "... cette comparaison pourrait fort bien, quelque jour, faire reconnaître qu'une de nos représentations s'ajuste mal aux réalités qu'elle doit figurer; que les corrections qui viennent compliquer notre schéma ne suffisent pas à reproduire une concordance suffisante entre ce schéma et les faits; que la théorie, longtemps admise sans conteste, doit être rejetée; qu'une théorie toute différente doit être construite sur des hypothèses entièrement nouvelles. Ce jour-là, quelque'une de nos hypothèses qui, prise isolément, défiait le démenti direct de l'expérience, s'écroulera, avec le système qu'elle portait, sous le poids des contradictions infligées par la réalité aux conséquences de ce système pris dans son ensemble". (Duhem, La Théorie Physique, p.328). La situation qu'impose l'abandon d'une théorie est caractérisée d'une façon trop vague par Duhem. Ses recherches en électrodynamique montrent qu'il n'a pas su prendre cette décision en ce qui concerne la théorie de Helmholtz. En ce qui concerne le "conventionalisme" et l'"empirisme" chez Poincaré, voir la dernière section du chapitre V et la note 146 du même chapitre.
213. Le deuxième de ces deux articles, publié d'une façon posthume en 1919, est une réponse aux critiques de Borel au premier article publié en 1915.
214. Duhem (cit. n.211), p.676.

215. Duhem "De Maxwell et de la manière allemande de l'exposer", 1919, p.131.
216. Ibid., p.120.
217. Ibid., p.121.
218. Ibid., p.122. Cette thèse rappelle la façon dont Duhem s'est utilisé des expériences sur la propagation des perturbations électromagnétiques pour "donner un sens physique" aux paramètres de la théorie de Helmholtz.
219. Ibid., p.123.
220. Ibid., p.124.
221. Ibid., p.118.
222. Duhem, L'évolution de la mécanique, 1903, p.180.
223. Duhem (cit. n.211), p.679.
224. Nous signalons, en passant, que Duhem ne semble donc voir aucune signification dans le fait que les équations de Lorentz sont fondamentalement différentes des équations de Maxwell, puisque les premières se réfèrent à des phénomènes microscopiques tandis que les deuxièmes se réfèrent à des phénomènes macroscopiques.
225. Duhem (cit. n.211), p.680.
226. Ibid., p.682.
227. Ibid., p.668.

## NOTES DES APPENDICES

1. Faraday M. Experimental Researches on Electricity. Cité par Heimann "Maxwell and the modes of consistant interpretation", p. 176.
2. Faraday (cit. n.1), § 1169.
3. Williams L. P. Michael Faraday, p. 287.
4. Faraday (cit. n.1), § 1166.
5. Ibid., § 1231.
6. Heimann (cit. n.1), pp. 178/9.
7. Faraday (cit. n. 1), § 1299.
8. Ibid., § 1167.
9. Cf. Williams (cit. n. 3), ch. 4.
10. Voir, Buchwald "Mossotti, O.F.", Dictionary of Scientific Biography.
11. Cf. Poisson "Sur la théorie du magnétisme en mouvement" in Mémoires de l'Académie des Sciences, vol. VI, p. 441.
12. Mossotti, "Sull'influenza ...", 1850.
13. Mossotti, "Recherches Théoriques ...", 1847, p. 195.
14. Duhem P; Les Théories Electriques de J.C. Maxwell, p. 18.
15. Mossotti "Recherches Théoriques ...", p. 196.
16. Voir Chapitre II, section 1.
17. Buchwald (cit. n. 10), p. 549.
18. Thomson S.P. The Life of William Thomson Baron Kelvin of Largs, London, 1910, vol. I, p. 128.
19. Thomson W. "On the mathematical theory of electricity in equilibrium" in Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism, article II.
20. Ibid., p. 26.
21. Thomson W. "On the Uniform Motion of heat in homogeneous solid bodies, and its connexion with the mathematical theory of electricity" (1842), in Reprint, note initiale datée de 1954.

22. Thomson (cit. n. 19), p. 29.
23. Duhem (cit. n. 14), pp. 23 et 29.
24. Thomson (cit. n. 19), p. 37.
25. Cf. Gooding D. "Faraday, Thomson, and the Concept of the Magnetic Field". L'auteur se réfère à "l'agnosticisme" de Thomson à l'époque. Il soutient qu'il y avait une convergence de points de vues chez Faraday et chez W. Thomson dans les années 40.
26. Cf. Smith "A new chart for British Natural Philosophy: energy physics".
27. Ibid., p. 246. Moyer dans son article "Energy, Dynamics ...", soutient une position contraire.
28. Ibid., p. 243.
29. Ibid., p. 255.
30. Maxwell A Treatise on Electricity and Magnetism, partie IV, p. 158.
31. Ibid., § 865.
32. Ampère A.M. Mémoires sur l'électromagnétisme et l'électrodynamique, Paris, Gauthiers-Villars, 1921, p. 30.
33. Le facteur  $(-1/2)$  a été, en fait, introduit par Ampère plus tard.
34. Ampère A.M. Théorie Mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience, 1826, pp. 1/2. Ampère n'était pas, en fait, un partisan de l'orthodoxie Newtonienne, malgré ses déclarations du début du mémoire de 1826.
35. Whittaker E.T. A history of the theories of aether and electricity, vol. I, pp. 200/1.
36. Maxwell (cit. n. 30), § 542.
37. Cf. Thomson J.J. "Report on Electrical Theories", 1885.
38. Nous avons utilisé l'indice pour différentier les composantes du courant dans l'élément  $dx dy dz$  de ceux dans l'élément  $dx dy dz$ . Helmholtz n'utilise pas cette notation. Nous enleverons donc ces indices à partir de l'éq. (9), une fois que la distinction a été faite dans les éqs. (6), (7) et (8).
39. Nous allons omettre d'une façon systématique toutes les expressions concernant des distributions superficielles de charge (dans des surfaces de séparation entre deux milieux différents).

40. L'opérateur  $\Delta = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$ .
41.  $\Psi$  ne doit pas être confondu avec la fonction définie par l'éq.(7).
42. Le paramètre  $A$  introduit dans l'équation (4) désigne le rapport entre les unités de charge. L'introduction de l'hypothèse que l'éther est polarisable, introduit aussi une différence entre la valeur mesurée de ce paramètre et la valeur "réelle" (c'est-à-dire d'un milieu impolarisable idéal). La relation entre ces deux valeurs est:

$$A_{\text{réel}} = A_{\text{mes.}} \times \frac{1}{\sqrt{1+4\pi\epsilon_0} \sqrt{1+4\pi\mathcal{D}_0}}$$

où  $\epsilon_0$  et  $\mathcal{D}_0$  sont les susceptibilités électrique et magnétique de l'éther polarisable. Cette transformation doit être introduite dans les équations (33) et (34) pour que les conditions de passage que Helmholtz posera, conduisent aux conséquences de la théorie de Maxwell.

43. Helmholtz, "Veber die Bewegungsgleichungen ...", p. 558. Cité par Woodruff "The Contributions of Hermann von Helmholtz...", p. 308.
44. Ibid., p. 556.
45. Wise "German concepts of force, energy and the electromagnetic ether ...", p. 300.

## BIBLIOGRAPHIE PRIMAIRE

- AMPERE A.-M., Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience, Paris, 1826
- BERTIN, "Compte-rendu du mémoire de Helmholtz 'sur la vitesse de propagation des actions électrodynamiques'", Ann. Chim. Phys., 23 (1871), p. 356.
- BERTRAND J., "Rapport sur le mémoire de Reynard 'Vue nouvelle sur la théorie des actions électrodynamiques'", C. R., 68 (1869), p. 1156; p. 1247.
- "Renaissance de la physique cartésienne", J. Sav., 69 (1869), p. 581-596; 662-689; 70 (1870), p. 225-242; 445-464.
  - "Note sur la théorie mathématique de l'électricité dynamique", C. R., 73 (1871), p. 965.
  - "Sur la démonstration de la formule qui représente l'action élémentaire de deux courants", C. R., 75 (1872), p. 743.
  - "Observations présentées à l'occasion d'une note de Helmholtz sur l'électrodynamique", C. R., 75 (1872), p. 860.
  - "Théorie mathématique de l'électricité", J. Sav., 72 (1872), p. 637-647; p. 700-709.
  - "Action mutuelle des courants voltaïques", C. R., 77 (1873), p. 962-970.
  - "Examen de la loi proposée par M. Helmholtz pour représenter l'action de deux éléments de courant", C. R., 77 (1873), p. 1049.
  - "Compte-rendu de l'ouvrage A treatise on electricity and magnetism de J. C. Maxwell", J. Sav., 73 (1873), p. 451-463.
  - "Note sur l'action de deux éléments de courant", C. R., 79 (1874), p. 141.
  - "Sur un nouveau mémoire de M. Helmholtz sur l'électrodynamique", C. R., 79 (1874), p. 337.
  - Leçons sur la théorie mathématique de l'électricité, professées au Collège de France, Paris, Gauthiers-Villars, 1890, 296 p.
  - "Les théories de Maxwell et la théorie électrodynamique de la lumière", J. Sav., 91 (1891), p. 742-745.
- BLASERNA P., "Mémoire sur la marche des courants induits et des extra-courants", Ann. Chim. Phys., 22 (1871), 4° s.
- BLONDLOT J.R. "Détermination expérimentale de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques", Ann. Tel., 19 (1892), 3° s., p.
- "Sur la vitesse de propagation des ondulations électromagnétiques dans les milieux isolants et sur la relation de Maxwell", Ann. Tel., 19 (1892), 3° s.

- BOLTZMANN L., Vorlesungen über Maxwells theorie der Elektrizität und des Lichtes, Leipzig, 2 vol., 1891/3.
- BOUSSINESQ J., "Théorie nouvelle des ondes lumineuses", J. Math., 13 (1868), 2° série, p. 313.
- Etude sur divers points de la philosophie des sciences, Paris, Gauthier-Villars, 1879, 122 p.
  - Cours de Physique Mathématique de la Faculté des Sciences, 4 tomes, Paris, 1901-1922.
- BRILLOUIN M., "Essai sur les lois d'élasticité d'un milieu capable de transmettre des actions en raison inverse du carré de la distance", Ann. Ec. N. Sup., 4 (1887), 3° s., p. 201-238.
- "Compte-rendu d'Electricité et Optique I et II", Bulletin Sci. Math. Ast., 15 (1891), 2° s., p. 130-146.
  - "Notes" in Conférences Scientifiques et Allocutions de W. Thomson, Paris, 1893.
  - "Pour la Matière", Revue Gen. Sci. P. App., 6 (1895), p. 1032-1034.
  - Propagation de l'électricité - Histoire et théorie, Paris, A. Hermann, 1904, 398 p.
- BRIOT C., Essais sur la théorie mathématique de la lumière, Paris, 1864, 132 p.
- BRUHNES B., "Sur la différence entre l'électrodynamique de Helmholtz et celle de Maxwell", Lum. Elect., 40 (1891), p. 15-24.
- CORNU A., Cours de physique rédigé par les élèves de l'Ecole Polytechnique, autographié, 1° année (1879-80); 2° année (1880-81); 2° année (1889-90); 2° année (1890-91).
- "Quelques notes de réponse à 'la déroute de l'atomisme contemporain'", Revue Gén. Sci. P. App., 1896, t. 6, p. 1030.
  - "La théorie des ondes lumineuses: son influence sur la physique moderne", The Rede Lecture (1899) in Memoirs Presented to the Cambridge Philosophical Society on the occasion of the jubilee of Sir George Stokes, Cambridge, 1900.
- DARBON A., L'explication mécanique et le nominalisme, Thèse Paris, Bordeaux, Impr. Cadoret, 1910, 216 p.
- DE LA RIVE A., Traité d'électricité théorique et appliquée, Paris, J-B. Bail lière, 3 vol.: I, 1854, 620 p.; II, 1856, 856 p.; III, 1858, 788 p.
- "Notice sur Emile Verdet", in Oeuvre de Emile Verdet, vol. I, 1872, p. I-XXVIII.
- DUHEM P., "Sur la théorie de l'induction électrodynamique", C. R., 100 (1885), p. 44-46.
- Leçons sur l'électricité et le magnétisme, Paris, Gauthier-Villars, 3 tomes : I, 1891, 560 p.; II, 1892, 480 p.; III, 1892, 528 p.
  - "Quelques réflexions au sujet des théories physiques", Revue Questions Sci., 1 (1892), 2° s., p. 139-176.
  - "Comptes-rendus des ouvrages:
    - Boltzmann, Vorlesungen über Maxwell's theorie der Elektrizität und des Lichtes, 1891

- Lorentz, La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants, 1892.
- Tumlirz, Théorie électromagnétique de la lumière, 1892,
- Hertz, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft, 1892",  
Revue Questions Sci., 3 (1893), 2° s., p. 259-264.
- "Physique et Metaphysique", Revue Questions Sci., 4 (1893), 2° s., p. 55-83.
- "L'école anglaise et les théories physiques", Revue Questions Sci., 4 (1893), 2° s., p.354-378.
- "Sur les lois générales de l'induction électrodynamique", Ann.Fac.Sci. Toulouse, 7 (1893).
- "Les actions électrodynamiques et électromagnétiques - Première partie: les forces électrodynamiques", Ann. Fac. Sci. Toulouse, 7 (1893).
- "Les actions électrodynamiques et électromagnétiques - Deuxième partie: les actions électromagnétiques", Ann. Fac. Sci. Toulouse, 8 (1894).
- "Les théories de l'optique", Revue des Deux Mondes, 123 (1894), p. 94-125.
- "Quelques remarques au sujet de l'électrodynamique des corps diélectriques proposée par J. C. Maxwell", in Comptes-rendus du 3° Congrès Scientifique International des Catholiques, 3-8/09/1894, Bruxelles, 1895, septième section: Sciences mathématiques et naturelles, p. 246-269.
- "Sur l'interprétation théorique des expériences Hertziennes", L'Eclairage Elect., 4 (1895), p. 494-502.
- "Sur l'équivalence des flux de conduction et des flux de déplacement", L'Eclairage Elect., 8 (1896), p. 110.
- "Sur l'électrodynamique des milieux diélectriques", Mémoires Soc. Sci. Phys. Nat. Bordeaux, 1 (1896), 5° s., p. 233-285.
- "Sur la propagation des actions électrodynamiques", Ann. Fac. Sci. Toulouse, 10 (1896), B/1-B/82.
- "Sur la théorie électrodynamique de Helmholtz et la théorie électromagnétique de la lumière", Arch. Néerlandaises Sci. Ex. Nat., 5 (1901), 2° s., p. 227-236.
- "Sur l'analogie entre les rayons X et les oscillations hertziennes", C. R., 135 (1902), p. 845.
- Les théories électriques de J. Clerk Maxwell, étude historique et critique, Paris, Hermann, 1902, 228 p.
- "Notes sur quelques points des théories électriques et magnétiques", Mémoires Soc. Sci. Phys. Nat. Bordeaux, 2 (1902), 6° s.
- L'évolution de la Mécanique, Paris, A. Joanin, 1903, 348 p.
- La Théorie Physique, son objet et sa structure, 1° ed., Paris, 1906; 2° ed., Paris, 1914; 3° ed., Paris, Vrin, 1981, 524 p., avec une introduction de P. Brouzeng.
- Le mouvement absolu et le mouvement relatif, Montligeon (Orne), 1909, 284 p.
- Traité d'énergetique ou de thermodynamique générale, Paris, Gauthiers-Villars, 1911, 2 vols.: I, 528 p.; II, 504 p.

- Notice sur les titres et travaux scientifiques, Bordeaux, 1913, 127 p.
  - "Examen logique de la théorie physique", in Notice sur les titres et travaux scientifiques, 1913, p. 108-114.
  - "Réflexions sur la science allemande", Revue des Deux Mondes, 25 (1915), p. 657
  - "Sur l'hypothèse de Faraday et de Mossotti et sur certaines conditions vérifiées au contact de deux diélectriques", C. R., 162 (1916), p. 409-415.
  - "Sur l'électrodynamique des milieux diélectriques", C. R., 162 (1916), p. 282.
  - "De Maxwell et de la manière allemande de l'exposer", La revue du mois, 20 (1919), p. 113-131.
- FARADAY M., Experimental Researches in Electricity, London, R. Taylor, 3 vols., 1839/1855.
- FITZGERALD G. F., "Poincaré and Maxwell", Nature, avril 1982, p. 284-287.
- GAUGAIN J. M., "Sur les relations qui rattachent la théorie de la distribution statique de l'électricité à la théorie de la propagation", Annales de Chimie et de Physique, 1862, t. 64, 3° s., p. 174.
- GERALDY F., "Compte-rendu de la traduction française du 1er. volume du Traité d'Electricité et de Magnétisme de J. C. Maxwell", Lum. Elect., 15 (1885).
- GLAZEBROOK R. T., "Report on Optical Theories", in Report of the Meeting of the British Association for the advancement of science, 1885, p.
- GORDON J. E. H., Traité expérimental d'électricité et de magnétisme, Paris, 1881, 2 vols., traduit de l'anglais par J. Raynaud, avec le concours de Seligmann-Lui, précédé d'une introduction par A. Cornu., p.
- GRAY A., "Maxwell's electromagnetic theories", Nature, 30 juin 1891, p. 296-299.
- "Electrodynamic theories and the electromagnetic theory of light", Nature, 45(1892), p. 367- 372 .
- HELMHOLTZ H. von, Mémoire sur la conservation de la force, Paris, 1869, 139 p.; 1° ed., Berlin, 1847.
- "Ueber die Bewegungsgleichungen der Elektrizität für ruhende leitende Körper", (1870), in Wissenschaftliche Abhandlungen, vol. I, p. 545-628.
  - "Vitesse de propagation des actions électrodynamiques", Revue Cours Sci., 7 (1871).
- HERTZ H. R., Principles of Mechanics, London, 1899. Préface de H. von Helmholtz.
- Electric Waves, ed. anglaise 1893, Préface de Lord Kelvin. 1° ed. allemande, 1892.
- JAMIN J. C., Cours de physique de l'Ecole Polytechnique, Paris, Gauthiers-Villars, 1° ed., 3 vol.: 1858/66; 2° ed., 3 vol.: 1863/69; 3° ed., 4 vol.: 1878/83; 4° ed., 4 vol.: 1885/1906.

- LAME G., Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides, Paris, 1852, 335 p.
- LEDERBOER P. H., "Sur les équations générales du mouvement de l'électricité", Lum. Elect., 1889, t. 33, p. 157; 204; 273; 417; 504; 615.
- LEVISTAL A., "Notice sur Emile Verdet", Ann. Sci. Ec. Normale Sup., 3 (1866), p. 343-51.
- LOVE A., A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, Cambridge, 2 vol.: 1892/3.
- MARIE-DAVY, Recherches théoriques et expérimentales sur l'électricité considérée au point de vue mécanique, Paris, 1er. fasc. 1861; 2ème fasc. 1862.
- MASCART E. et JOUBERT J., Leçons sur l'électricité et le magnétisme, Paris, 1° ed., 2 vol.: I, 1882; II, 1886; 2° ed., 2 vol.: I, 1896; II, 1897.
- MASCART E., Traité d'électricité statique, Paris, 2 vol., 1876.
- MATHIEU E., Théorie du potentiel et ses applications à l'électrostatique et au magnétisme, 1er. partie: "Théorie du Potentiel", 1885; 2ème. partie: "Electrostatique et magnétisme", 1886; (vol. 3 du Traité de Physique Mathématique).
- Théorie de l'électrodynamique, Paris, 1888; (vol. 5 du Traité de Physique Mathématique).
- MAXWELL J. C., "On Faraday's lines of force", 1855/6, in Niven (ed.), The scientific papers of James Clerk Maxwell, 1890, vol. I, p. 155-229.
- "Are there real analogies in Nature?", 1856, in Campbell et Garnett, Life of J. C. Maxwell, p. 235-244.
  - "On Physical lines of force", 1861/2, in Papers, vol. I, p. 451-513.
  - "A Dynamical Theory of the electromagnetic field", 1864, in Papers, vol. I, p. 526-597.
  - "A note on the electromagnetic theory of light", 1868, in Papers, vol. II, p. 137-143.
  - "Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association", 1870, in Papers, vol. II, p. 217.
  - "On the mathematical classification of physical quantities" in Papers, vol. II, p. 257-265.
  - "Rapport des sciences physiques avec les mathématiques", Revue Sci., 8 (1871).
  - A Treatise on electricity and magnetism, 1° ed. 1873; 2° ed. 1881; 3° ed. 1891. Réimpression de la 3° ed., New York, Dover, 1954, 2 vols.: I, 506 p.; II, 500 p.
  - "Les molécules des corps", Revue Sci., 12 (1873).
  - "L'action à distance", Revue Sci., 12 (1873).
  - Matter and Motion, 1° ed., London, 1877; 2° ed. 1924. Réimpression de la 2° ed., New York, Dover, 1951.
  - Traité élémentaire d'électricité, traduit de l'anglais par G. Richard, Paris, Gauthier-Villars, 1884, 275 p.; précédé d'une notice sur les travaux en électricité du prof. Maxwell par W. Garnett.
  - Traité d'Electricité et de Magnetisme, Paris, 2 vol.: I, 1885; II, 1887; avec des notes et éclaircissements par Cornu, Potier et Sarrau.

- "Ether" in Papers, vol. II, p. 763-775.
- MOSSOTTI O. F., "Recherches théoriques sur l'induction électro-statique envisagée d'après les idées de Faraday", Supplément à la Bibliothèque Universelle de Genève, Archives des Sciences Physiques et Naturelles, Paris, 1847.
- "Sull'influenza che l'azione di un mezzo dielettrico ha sulla distribuzione dell'elettricità alla superficie di più corpi elettrici disseminati in esso", Memorie di matematica e di fisica della Società italiana, 24 (1850), pt. 2, 1° s., p. 49-74.
- MOUTIER J., "Sur les attractions et les répulsions des corps électrisés au point de vue de la théorie mécanique de l'électricité", Ann. Ch. Phys., 16 (1869), 4° s., p. 108-130.
- OSTWALD W., "La déroute de l'atomisme contemporain", Revue Gén. Sci. Pures Appliquées, 1895, t. 6, p. 953-958; p. 1069-1071.
- POINCARÉ H., Leçons sur la théorie mathématique de la lumière, Paris, Georges Carré, 1889, 401 p.
- Electricité et Optique, 1° ed., Paris, G. Carré, 2 vol.: I, 1890, 314 p.; II, 1891, 262 p.
  - Les oscillations électriques, Paris, G. Carré, 1894, 343 p.
  - "La lumière et l'électricité d'après Maxwell et Hertz", Annuaire du bureau des longitudes, 1894, p. A/1-A/22.
  - "A propos de la théorie de M. Larmor", 1895, in Electricité et Optique, 2° ed., 1901, p. 577-632.
  - "Les idées de Hertz sur la Mécanique", Revue Gen. Sci., 8 (1897), p. 734-743.
  - La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes, coll. Scientia, Paris, G. Carré et Naud, 1899, 80 p.
  - "A propos des expériences de M. Cremieu", Revue Gén. Sci. Pures Appliquées, 12 (1901), p. 994-1007.
  - Electricité et Optique, 2° ed., Paris, G. Carré et C. Naud, 1901, 641 p.
  - "Préface" à l'ouvrage Etat actuel de la science électrique de Devaux-Charbonnel, Paris, 1908.
  - La science et l'hypothèse, Paris, Flammarion, 1938, 292 p.
- POTIER A., "Egalité des constantes numériques fondamentales de l'optique et de l'électricité", J. Phys., 2 (1873), 1° s., vol. 2, p. 377-388.
- Cours de Physique, professé à l'Ecole Polytechnique, 1ère division 1887/8; 1891/2; 1893/4, 2ème. division: 1882/3; 1888/9; 1892/3, lithographié.
  - "Notes" in Traité d'Electricité et de Magnétisme de J. C. Maxwell, Paris, 2 vol.: I, 1885; II, 1887.
  - Mémoires sur l'électricité et l'optique, publiés et annotés par A. Blondel. Avec une préface de H. Poincaré, Paris, Gauthier-Villars, 1912, 330 p.
- REYNARD F., "Lettre présentant une 'Note sur le mode d'action des forces électrodynamiques'", C. R., 59 (1864), p. 959.
- "Sur la théorie des actions électrodynamiques", C. R., 67 (1868) p. 996-8.

- "Nouvelle théorie des actions électrodynamiques", Ann. Ch. Phys., 19 (1870), 4° s., p. 272-328.
- ROY L., L'électrodynamique des milieux isotropes en repos d'après Helmholtz et Duhem, Paris, Gauthier-Villars, 1923, 94 p.
- SARRAU E., "Notes" in Traité d'Electricité et de Magnétisme de J. C. Maxwell, Paris, 2 vol.: I, 1885; II, 1887.
- "Sur l'application des équations de Lagrange aux phénomènes électrodynamiques et électromagnétiques", C. R., 133 (1901), n° 10, p. 421-425.
- STOLETOV A., "Sur une méthode pour déterminer le rapport des unités électromagnétiques et électrostatiques (le  $v$  de Maxwell)", J. Phys., 10 (1881), p. 468-474.
- "L'éther et l'électricité", Lum. Elect., 35 (1890), p. 517-520; p.556-567.
- THOMSON J. J., "Report on Electric Theories" in Report of the Meeting of the British Association for the Advancement of Science, 1885, p. 97-155.
- THOMSON W., Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism, London, 1872, 592 p.
- THOMSON W. et TAIT P. G., Treatise on Natural Philosophy, vol. I, Cambridge, 1879.
- TODHUNTER I. et PEARSON K., A History of the theory of Elasticity and of the strength of materials from Galilei to the present time, Cambridge, 2 vol., 1886-1893.
- TUMLIRZ O., Théorie Electromagnétique de la Lumière, 1° ed., Prague, 1883. Traduction française, Paris, Hermann, 1892, 157 p.
- VERDET E., "Revue des travaux de physique publiés à l'étranger", Annales de Chimie et de Physique, 1852-1864.
- "Recherches sur les propriétés optiques développées dans les corps transparents par l'action du magnétisme", Ann.Ch. Phys., 3° s., 41 (1854), p. 370-412; 43 (1858), p. 37-44; 52 (1858), p. 129-163; 69 (1863), p. 415-491.
- "Addition à la 4ème partie des recherches sur les propriétés optiques développées dans les corps transparents par l'action du magnétisme", C. R., 57 (1863), p. 670-674.
- Cours de physique professé à l'Ecole Polytechnique, 1868-9, in Oeuvres, vols. II-III.
- Leçons d'Optique Physique, 1869-1870, in Oeuvres, vols. V-VI.
- Conférences de Physique faites à l'Ecole Normale Supérieure, Paris, 1872, in Oeuvres, vol. 4, 2 tomes.
- VOLTERRA V., HADAMARD J., LANGEVIN P., BOUTROUX P., Henri Poincaré. L'Oeuvre scientifique. L'Oeuvre philosophique, Paris, Alcan, 1914, 267 p.

## BIBLIOGRAPHIE SECONDAIRE

- d'AGOSTINO S., "Il pensiero scientifico di Maxwell e lo sviluppo della teoria del campo elettromagnetico nella memoria 'On Faraday's Lines of Force' ", Scientia 103 (1968), p. 291-301.
- "Hertz and Helmholtz on electromagnetic waves", Scientia, 1971, p. 11-
  - "Hertz's researches on electromagnetic waves", Hist. Stud. Phys. Sci., 6 (1975), p. 261-323.
- BROMBERG J., "Maxwell's Displacement Current and his Theory of Light", Arch. Hist. Ex. Sci., 4 (1967), p. 218-234.
- "Maxwell's Electrostatics", Am. J. Phys., 36 (1968), p. 142-151.
- BUCHWALD J. Z., "The quantitative ether in the first half of the nineteenth century", in Cantor et Hodge (eds.): Conceptions of ether, Cambridge University Press, 1981, p. 215-237.
- BUNGE M., " Lagrangian Formulation and Mechanical Interpretation", Am. J. Phys., 25 (1957), p. 211-218.
- CAMPBELL L. et GARNETT W., The life of James Clerk Maxwell, London, 1882, xvi + 662 p.
- CANEVA K. L., "Ampère, the Etherians and the Oersted connexion", Brit. J. Hist. Sci., 13 (1980) n° 2, p. 121-138.
- CANTOR G., "The reception of the wave theory of light in Britain: A case study illustrating the role of methodology in scientific debate", Hist. Stud. Phy. Sci., 6 (1975), p. 109-132.
- CAZENOBÉ J., "Comment Hertz a-t-il eu l'idée des ondes hertziennes?", Revue Synthèse, 101 (1980), p. 345-382.
- "Les incertitudes d'une découverte: l'onde de Hertz de 1888 à 1900", Arch. Int. Hist. Sci., 32 (1982), n° 109.
  - La Visée et l'Obstacle, Paris, C.N.R.S., 1983, 248 p.
- CHALMERS A. F., "Maxwell's Methodology and his Application of it to Electromagnetism", St. Hist. Phyl. Sci., 4 (1973), n° 2, p. 107-164.
- "The limitations of Maxwell's electromagnetic theory", Isis, 64 (1973), p. 469-483.
- COHEN I. B., "Conservation and the concept of electric charge: an aspect of philosophy in relation to physics in the nineteenth century", in Claggett (ed.) - Critical Problems in the history of science, Madison, 1959, p. 357-383.

- CROSLAND M. et SMITH C., "The transmission of physics from France to Britain: 1800-1840", Hist. Stud. Phys. Sci., 9 (1978), p. 1-61.
- DOLBY R. G. A., "The Transmission of Science", Hist. Sci., 15 (1977), p. 1-43.
- DORAN B. G., "Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth Century Britain: From the Mechanical to the Electromagnetic View of Nature", Hist. Stud. Phys. Sci., 6 (1975), p. 133-260.
- EVERITT C. W. F., "Maxwell, James Clerk" in Dictionary of Scientific Biography, 9 (1974), p. 198-230.
- FOX R., "The Rise and Fall of Laplacian Physics", Hist. Stud. Phys. Sci., 4 (1974), p. 89-136.
- GARDINER K. R. et D. L., "André-Marie Ampère and His English Acquaintances", Brit. J. Hist. Sci., 2 (1965), p. 235-245.
- GILLISPIE C. C., The edge of objectivity, Princeton, 1960, 562 p.
- GOLDBERG S., "Henry Poincaré and Einstein's theory of relativity", Am. J. Phys., 35 (1967), p. 934-944.
- "Poincaré's Silence and Einstein's Relativity: The Role of Theory and Experiment in Poincaré's Physics", Brit. J. Hist. Sci., 5 (1970/1), p. 73-84.
- GOODING D., "Faraday, Thomson, and the concept of the magnetic field", Brit. J. Hist. Sci., 13 (1980), n° 44, p. 91-120.
- HAMAMDJIAN P. G., "Les concepts de métaphore scientifique et de système de métaphores scientifiques de Maxwell" in Lichnerowicz, Perroux, Gadoffre (eds.), Analogie et Connaissance, Paris, Maloine, 1980, t. I, p. 179-204.
- HARMAN P. M., Energy, Force and Matter: the conceptual development of Nineteenth-Century Physics, Cambridge, 1982, 182 p.
- HEIMANN P. M., "Maxwell and the Modes of Consistent Representation", Arch. Hist. Esc. Sci., 6 (1969/70), p. 171-213.
- "Maxwell, Hertz, and the Nature of Electricity", Isis, 62 (1971), p. 149-157.
  - et McGuire J. E., "Newtonian Forces and Lockean Powers: Concepts of Matter in Eighteenth Century Thought", Hist. Stud. Phys. Sci., 3 (1971), p. 233-306.
  - "The Unseen Universe: physics and the philosophy of nature in Victorian Britain", Brit. J. Hist. Sci., 6 (1972), p. 73-79.
- HERIVEL J. W., "Aspects of French theoretical physics in the Nineteenth Century", Brit. J. Hist. Sci., 3 (1966/7), p. 109-32.
- HESSE M. B., Forces and fields: the concept of action at a distance in the history of physics, London, Thomas Nelson and Sons, 1961, x + 318 p.
- HESS M., "Logic of discovery in Maxwell's electromagnetic theory" in Giere et Westfall (eds.), Foundations of Scientific Method: the Nineteenth Century, Bloomington, Indiana Univ. Press, 1973, p. 86-114.

- HIROSIGE T., "Origins of Lorentz's theory of electrons and the concept of the electromagnetic field", Hist. Stud. Phys. Sci., 1 (1969), p. 151-209.
- "The ether problem, the mechanistic world view, and the origins of the theory of relativity", Hist. Stud. Phys. Sci., 7 (1976), p. 3-82.
- KARGON R., "Model and Analogy in Victorian Science: Maxwell's Critique of the French Physicists", J. Hist. Ideas, 30 (1969), p. 423-436.
- KLEIN M. J., "Mechanical explanation at the end of the nineteenth century", Centaurus, 17 (1973), p. 58-82.
- KUHN T., The Structure of Scientific Revolutions, Princeton University Press, 1962,
- "Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery" in The Essential Tension, Chicago, 1977, p. 66-104.
- Mc GUIRE J. E., "Forces, Powers, Ethers and Fields", Boston Studies in the philosophy of Science, 14 (1974), p. 119-159.
- LAKATOS I., The methodology of scientific research programmes, Worrall et Currie (eds.), vol. I, Cambridge, 1978, 250 p.
- MERZ J. T., A History of European scientific thought in the nineteenth century, New York, Dover, 2 vol., 1965,
- MILLER A. I., "A Study of Henri Poincaré's 'Sur la Dynamique de l'Electron' ", Arch. Hist. Ex. Sci., 10 (1973), p. 207-328.
- "On some other approaches to electrodynamics in 1905", in Some Strangeness in the Proportion, (Centennial Symposium to celebrate the achievements of Albert Einstein), London, Addison-Wesley, 1980, p. 66-91.
- MOYER D. F., "Energy, Dynamics, Hidden Machinery: Rankine, Thomson and Tait, Maxwell", Stud. Hist. Phil. Sci., 8 (1977), p. 251-268.
- "Continuum Mechanics and Field Theory: Thomson and Maxwell", Stud. Hist. Phil. Sci., 9 (1978), p. 35-50.
- OLSON R., Scottish philosophy and British physics 1750-1880, Princeton, 1975,
- O'RAHILLY A., Electromagnetics, London, Cork Univ. Press, 1938, 859 p.
- PAUL H. W., "The Issue of Decline in Nineteenth-Century French Science", French Hist. Stud., 7 (1972), p. 416-50.
- ROSENFELD L., "The velocity of light and the evolution of electrodynamics", Nuovo Cimento, supp., 10° s., 4 (1956), p. 1630-1669.
- SIEGEL D. M., "Thomson, Maxwell, and the universal ether in Victorian physics", in Cantor et Hodge (eds.): Conceptions of ether, Cambridge, University Press, 1981, p. 239-268.
- SIMPSON T. K., "Maxwell and the Direct Experimental Test of his Electromagnetic Theory", Isis, 57 (1966), p. 411-432.
- "Some Observations on Maxwell's Treatise on Electricity and Magnetism", Stud. Hist. Phil. Sci., 1 (1970), p. 249-263.

- SMITH C., "Mechanical Philosophy and the emergence of physics in Britain: 1800-1850", Ann. Sci., 33 (1976), p. 3-29.
- "A new chart for British Natural Philosophy: the development of energy physics in the Nineteenth Century", Hist. Sci., 16 (1978), p. 231-279.
- TURNER J., "A Note on Maxwell's Interpretation of some Attempts at Dynamical Explanation", Ann. Sci., 11 (1955), p. 238-245.
- "Maxwell on the Logic of Dynamical Explanation", Phil. Sci., 23 (1956), p. 36-47.
  - "Maxwell on the Method of Physical Analogy", Brit. J. Phil. Sci., 6 (1956), p. 226-238.
- WHITTAKER E. T., A history of the theories of aether and electricity, 2 vol: I, 1910; II, 1926.
- WILLIAMS L. P., Michael Faraday, London, Chapman and Hall, 1965, 531 p.
- WISE M. N., "The flow analogy to electricity and magnetism, Part I: William Thomson's reformulation of action at a distance", Arch. Hist. Esc. Sci., 25 (1981), n° 1, p. 19-70.
- "German concepts of force, energy, and the electromagnetic ether: 1845-1880", in Cantor et Hodge (eds.): Conceptions of ether, Cambridge Univ. Press, 1981, p. 269-307.
  - "The Maxwell literature and British dynamical theory", Hist. Stud. Phys. Sci., 13 (1982), n° 1, p. 175-205.
- WOODRUFF A. E., "Action at a Distance in Nineteenth-Century Electrodynamics", Isis, 53 (1962), p. 439-459.
- "The Contributions of Hermann von Helmholtz to Electrodynamics", Isis, 59 (1968), p. 300-311.