



CHRISTINE BLONDEL

**AMPÈRE
ET LA CRÉATION
DE
L'ÉLECTRODYNAMIQUE**

Paris
1982

MÉMOIRES
. DE LA
SECTION DES SCIENCES

10

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE
COMITÉS DES TRAVAUX HISTORIQUES ET SCIENTIFIQUES

MÉMOIRES DE LA SECTION DES SCIENCES

10

Christine BLONDEL

**A.-M. AMPÈRE
ET LA CRÉATION
DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE**

(1820-1827)

PARIS
BIBLIOTHÈQUE NATIONALE
1982

ISBN 2-7177 1643-2

Bibliothèque nationale, Paris, 1982

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par
tous procédés, y compris la photographie et le microfilm, réservés
pour tous pays

En 1801, soit 20 ans avant sa découverte des phénomènes électrodynamiques, Ampère écrivait dans l'introduction d'un mémoire inédit sur l'électricité et le magnétisme :

« J'ai donc pu me flatter que le hasard m'avait favorisé d'une de ces idées qui ouvrent aux physiciens une carrière nouvelle lorsqu'après avoir réduit tous les phénomènes de l'aimant et de l'électricité à un principe unique, j'ai vu naître de ce principe les applications les plus simples et les plus naturelles d'un grand nombre de faits dont les causes étaient ignorées

« Cette action se propageant de proche en proche suffit pour expliquer, ainsi qu'on va le voir tous les phénomènes qui appartiennent à cette théorie dont on pourra faire à l'avenir une branche de la mécanique.

« Il ne faut plus pour cela qu'un génie capable d'y appliquer le calcul qui a produit tant de merveilles entre les mains des mathématiciens modernes. »

(Annexe II, p. 175)

ABRÉVIATIONS

A.C.P.	<i>Annales de Chimie et de Physique</i>
A.G.S.P.	<i>Annales Générales des Sciences Physiques</i> (Bruxelles)
Bibl. Univ.	<i>Bibliothèque Universelle</i> , série Sciences et Arts (Genève)
Bull. Sc. Soc. Phil.	<i>Bulletin des Sciences de la Société Philomatique de Paris</i>
J. Phys.	<i>Journal de Physique</i>
M.A.R.S.	<i>Mémoires de l'Académie Royale des Sciences</i>
Recueil	<i>Recueil d'Observations électro-dynamiques</i> , par M. Ampère, 1822
Coll. Mem.	<i>Collection de mémoires relatifs à la physique</i> , t. II et III, 1885
Correspondance	<i>Correspondance du Grand Ampère</i> , éditée par Louis de Launay, t. I et II, 1936 ; t. III, 1943
Arch. Ac. Sc.	Archives de l'Académie des Sciences de Paris.

INTRODUCTION

Bien que pour Ampère lui-même la métaphysique fût la science « la plus belle et la plus digne des efforts des hommes » ¹, c'est à la seule partie de ses travaux relatifs à l'électrodynamique que cette étude est consacrée. Ce n'est pas que nous négligions la valeur de ses recherches en mathématiques, en chimie, sciences naturelles, et enfin en philosophie, mais l'électrodynamique est, sans conteste, la partie de son œuvre qui a eu la plus grande influence. En outre, un éclairage complet de cette pensée kaléidoscopique, en particulier pour y déceler les interactions entre les différentes branches de la connaissance, nécessitait une étude détaillée de sa partie fondamentale, étude qui n'existait pas encore ².

La comparaison entre la bibliographie des études sur les théories électromagnétiques de Faraday et Maxwell d'un côté et celle des études sur la théorie d'Ampère de l'autre suffit à montrer que si la théorie du champ, c'est-à-dire la théorie actuelle, a largement retenu l'attention des historiens et philosophes des sciences, par contre la théorie « newtonienne » d'Ampère a longtemps souffert du demi-silence dont sont entourées les théories physiques qui ne sont plus enseignées.

Il est inutile de rappeler ici les arguments en faveur de l'étude de ce que certains ont appelé des « impasses historiques »

Un point mérite cependant d'être souligné, c'est l'importance historique de la théorie électrodynamique d'Ampère. En effet, elle a dominé tout le 19^e siècle, du moins en France et en Allemagne. Encore en 1902, P. Duhem pouvait écrire : « Je ne sache pas que l'électrodynamique de Maxwell ait plus contribué au développement de la physique que l'électrodynamique d'Ampère, ce parfait modèle des théories que . construisaient, au commencement du siècle, des génies élevés à l'école de Newton »³

De même à l'Université de Königsberg, dans les années 1890, lorsque A. Sommerfeld y était étudiant, l'électrodynamique était encore enseignée « à l'ancienne manière », c'est-à-dire à partir des lois de Coulomb, Biot-Savart, Ampère et ses successeurs « toutes fondées sur le concept newtonien de l'action à distance »⁴.

Pour tenter de mieux comprendre cette œuvre qu'on oppose souvent radicalement à celles de Faraday et Maxwell, tant du point de vue des méthodes de recherches, des rôles respectifs des mathématiques et de l'expérimentation, ou des principes de base, nous avons étudié l'ensemble des recherches électrodynamiques d'Ampère avec une attention particulière pour la première phase de ces recherches, la phase de création de la théorie.

1 B. SAINT-HILAIRE, *Philosophie des deux Ampère*, 1866, p. 7.

2 Les études les plus complètes sur les recherches électrodynamiques d'Ampère sont celles de L.P. WILLIAMS et de R.A.R. TRICKER (Bibliographie & II, réf. 23-26).

3 P. DUHEM, *La théorie physique, son objet, sa structure*, 1906, p. 321.

4 A. SOMMERFELD, *Electrodynamics*, New York, 1971, 5^e édition, p. 1.

En effet, si Louis de Launay a pu déclarer dans sa biographie d'Ampère qu'il voyait en ce dernier « un exemplaire accompli (...) du génie produisant des découvertes par un phénomène de germination spontanée comparable à une force de la nature » ⁵, c'est qu'Ampère, comme de nombreux autres savants, a volontairement effacé les traces de ce processus de création dans l'exposé de sa théorie.

Avant d'utiliser le microscope pour tenter de retrouver ces traces, il fallait cerner le champ d'étude : la présentation de l'état des théories électriques, magnétiques et voltaïques avant la découverte de l'électromagnétisme par Ørsted en 1820 est suivi d'un aperçu des principales recherches des physiciens européens à la suite de cette découverte. En particulier parmi les partisans de la magnétisation du fil conducteur parcouru par un courant, on verra J.B. Biot déduire la loi qui porte son nom joint à celui de Savart, à partir de résultats expérimentaux qui impliquaient une autre loi.

Cette confrontation de mémoires de qualités très variables permet de préciser le niveau des travaux des physiciens ou des amateurs éclairés qui, à cette époque, peuvent encore présenter des articles à côté des plus grands noms de la science.

Pour reconstituer la genèse de la théorie d'Ampère, nous avons utilisé outre les mémoires publiés déjà connus, des notices peu connues qu'Ampère avait dispersées dans diverses revues et surtout ses manuscrits qui remplissent une quarantaine de cartons aux Archives de l'Académie des sciences.

Ces manuscrits nous ont permis de préciser de nombreux points dans la genèse de la théorie, indiqué des projets d'expériences, des aveux d'échecs ... , montré enfin les détours et les audaces de la pensée avant sa fixation sur la page imprimée.

Parmi ces manuscrits nous publions l'autobiographie rédigée par Ampère en 1824 ⁶ ainsi que le brouillon de l'Introduction du mémoire inédit sur l'électricité et le magnétisme de 1801 dont Ampère lut une partie devant Volta lors de la séance solennelle de l'Académie de Lyon du 24 décembre 1801.

Cette Introduction (Annexe II) montre qu'à cette époque Ampère critique la théorie de Coulomb, refuse l'action instantanée à distance et propose de réduire l'électricité et le magnétisme à une branche de la mécanique grâce à une propagation de proche en proche.

Il est frappant de retrouver des considérations du même ordre dans un des derniers mémoires d'Ampère, vingt-cinq ans plus tard, considérations sur l'éther et son rôle dans la propagation des actions électromagnétiques dont l'intérêt doit être souligné ⁷.

Le texte d'un mémoire resté inédit du vivant d'Ampère, donné ici en Annexe III, montre la permanence de ces préoccupations tout au long de ses recherches.

⁵ L. DE LAUNAY, *Le Grand Ampère*, 1925, p. X.

⁶ Cette autobiographie a été largement utilisée par L. DB. LAUNAY (voir n. 5) mais elle n'a jamais été publiée.

⁷ Mémoire lu le 21 novembre 1825 l'Académie Royale des Sciences (Bibliographie I, 54).

L'ARRIÈRE-PLAN CONCEPTUEL ET EXPÉRIMENTAL : ÉLECTRICITÉ, MAGNÉTISME ET VOLTAÏSME EN 1820

I. LES THÉORIES NEWTONIENNES DE L'ÉLECTRICITÉ ET DU MAGNÉTISME DE 1785 A 1820

La question des rapports entre l'électricité et le magnétisme fut reprise de façon systématique à la fin du 18^e siècle par J.H. van Swinden dans son *Recueil de mémoires sur l'analogie de l'électricité et du magnétisme*, paru à La Haye en 1784.

S'il répond avec vigueur par la négative à la question posée par l'Académie de Bavière en 1774 et 1776 : « y a-t-il une analogie vraie et physique entre la force électrique et la force magnétique ? »¹, c'est avec un certain regret que la théorie du magnétisme soit si faible, ce qu'il explique par le fait que « les physiciens se sont en général plus occupés à bâtir des systèmes pour expliquer les phénomènes de l'aimant (...) qu'à creuser, qu'à analyser, qu'à approfondir les phénomènes eux mêmes »².

Le vœu qu'il forme « de faire de cette partie de la physique une branche des sciences physico-mathématiques », ne fut cependant pas réalisé par lui, mais dès l'année suivante, par celui dont le nom reste attaché aux lois de l'électrostatique et de la magnétostatique : C. Coulomb.

1. Charles Coulomb

En effet, les conclusions de Van Swinden stimulèrent dans ses propres recherches le lieutenant de génie Coulomb, qui avait déjà remporté un prix de l'Académie des sciences en 1777 pour un mémoire sur la meilleure manière de fabriquer les aiguilles aimantées. Au cours de ses travaux de mécanique, il avait aussi inventé la balance de torsion et analysé le principe de son utilisation pour la mesure des forces faibles³. C'est avec cet instrument qu'il entreprend de mesurer avec précision les forces électriques et magnétiques.

Depuis Franklin pour l'électricité, et Aepinus pour le magnétisme, le modèle de l'action à distance s'est imposé comme explication de ces phénomènes ; cependant, Coulomb croit devoir insister,

¹ 1 *Recueil de mémoires sur l'analogie de l'électricité et du magnétisme, couronnés et publiés par l'Académie de Bavière, traduits du latin et de l'allemand, augmentés de notes et de quelques dissertations nouvelles*. La Haye, 1784, t. I, p. V.

² *Ibid.*, p. XXVI ET XXVIII.

³ Sur Coulomb et son œuvre : *Charles-Augustin Coulomb : Physics and Engineering in Eighteenth Century France*, C.S. Gillmor, 1971.

encore sur le rejet définitif des tourbillons de Descartes, et après lui toute théorie électrique ou magnétique soupçonnée d'influence cartésienne est violemment discréditée⁴.

Pour montrer que la force s'exerçant entre deux boules électrisées ou entre deux pôles d'aimant est inversement proportionnelle au carré de leur distance, Coulomb utilise deux procédés qui exercèrent une grande influence sur les physiciens français : une méthode statique (la balance de torsion) et une méthode dynamique (la mesure de la période des oscillations de l'un des corps soumis à l'influence de l'autre).

Ce qui est remarquable dans cette célèbre série de sept mémoires lus entre 1785 et 1791⁵, peut être plus que la loi en $1/d^2$ elle-même qui avait été suggérée par plusieurs savants au cours du 18^e siècle, c'est la précision à laquelle Coulomb aspire et la rigueur avec laquelle ses expériences sont menées. Pendant un demi-siècle, les résultats numériques de ces expériences figureront dans les traités d'électricité, à la fois comme preuve des fondements de la science électrique et, souligne A. de la Rive en 1833, comme « modèle de la méthode que l'on doit suivre »⁶.

C'est surtout l'électricité qui a retenu l'attention de Coulomb: les résultats de ses nombreuses observations sur la répartition des charges électriques à la surface des conducteurs, furent repris par Poisson en 1811 pour établir ses théorèmes sur l'électrostatique. Dans le domaine du magnétisme, c'est le fondement même de la théorie qui eut le plus d'influence.

En effet, Coulomb fut le premier à stipuler que les deux fluides magnétiques ne peuvent se déplacer librement à l'intérieur de l'aimant, comme le font les fluides électriques dans un conducteur, et à expliquer l'expérience de l'aimant brisé en supposant les deux fluides répartis en quantités égales dans ce qu'il appelle des « molécules aimantaires »⁷, et non situés- seulement aux deux pôles de l'aimant.

Ses mesures de forces entre aimants étaient cependant moins précises que celles des forces électriques, et déjà pour ses contemporains la loi de force semblait moins fermement établie pour le magnétisme que pour l'électricité.

2. Les scepticismes rencontrés par sa théorie

L'œuvre de Coulomb, qui nous semble aujourd'hui le fondement de l'électrostatique, ne fut pas toujours perçue ainsi par ses contemporains, surtout anglo-saxons. Ainsi, comme le remarque J.B. Biot en 1816 : « Les principes généraux (en physique) sont loin d'être universellement reconnus. S'agit-il d'électricité, les Français raisonneront dans l'hypothèse des deux fluides, telle que Coulomb l'a présentée ; les Anglais préféreront l'idée d'un seul fluide développée par Cavendish, et Volta fera les plus brillantes découvertes, en admettant l'existence des atmosphères électriques, auxquelles ni les uns, ni les autres n'accordent aucune réalité »⁸.

4 Ainsi, même si A. Libes reconnaît (dans son *Histoire philosophique des progrès de la physique*, 1810, p. 53) que « L'homme doit à Descartes d'avoir recouvré la liberté de penser », il énonce l'opinion commune à son époque lorsqu'il affirme « le génie de Newton n'engendre que ces réalités, celui de Descartes n'enfante le plus souvent que des chimères » p. 42).

5 *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 1785, 1786, 1787, 1788, 1789. Les principaux mémoires de Coulomb ont été regroupés par A. Potier dans le volume 1 de la *Collection de mémoires relatifs à la physique*, publié par la Société Française de Physique (Paris, 1884).

6 *Bibliothèque universelle*, sciences et arts, t. 52, 1833, p. 237.

7 *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 1789, p. 481.

8 J.B. BIOT, *Traité de physique expérimentale et théorique*, 1816, t. I, p. II.

L'ARRIÈRE-PLAN CONCEPTUEL ET EXPÉRIMENTAL

Même un ouvrage de physique français comme le *Traité élémentaire de physique* de A. Libes, expose toutes les théories en présence sur l'électricité : celles d'Aepinus et Franklin, à un seul fluide, et celle de Coulomb à deux fluides pour laquelle il reconnaît cependant sa préférence ⁹

David Brewster dans son article « Electricity », pour *l'Edinburgh Encyclopaedia*, consacre seize pages à la théorie à un fluide, et seulement trois à celle de Coulomb. Et lorsque le traité de G. Singer, *Elements of electricity and electro-chemistry* (1814) est traduit en français par J.B. Thillaye, ce dernier doit ajouter des notes explicatives se référant à l'œuvre de Coulomb pour faire comprendre l'ouvrage.

La réserve exprimée par les savants anglais face à la théorie de Coulomb, se justifiait par le fait qu'aucune expérience ne pouvait départager les deux théories. Une telle expérience n'était d'ailleurs pas recherchée dans la mesure où les phénomènes connus s'expliquaient aussi bien par l'une que par l'autre ¹⁰,

Le seul argument opposable à la théorie à un seul fluide est développé par Biot : dans cette théorie il faut « supposer que les molécules électriques sont attirées par la matière propre des corps (et) encore admettre que les molécules des corps exercent les unes sur les autres une action répulsive sensible à de grandes distances, comme les influences (électriques) elles-mêmes »¹¹. Ceci est contradictoire avec l'attraction universelle de la matière.

Cependant, après la série d'expériences sur l'électrolyse menées en Angleterre entre 1800 et 1806, la théorie des deux fluides est souvent reconnue comme mieux à même d'expliquer ces phénomènes dualistes.

3. L'électrostatique : Poisson, Laplace

En 1812 les résultats de Coulomb semblent à Poisson établis sur des bases expérimentales suffisamment solides pour qu'il y applique son talent mathématique. L'expression de la force électrique s'exerçant entre deux charges ponctuelles étant connue, il veut généraliser à l'action entre deux corps chargés de formes quelconques. Pour cela, il faut au préalable déterminer la répartition de la charge électrique à la surface de chacun des corps. Ce problème ne peut se résoudre par analogie avec la gravitation car l'électricité est mobile à l'intérieur des conducteurs, tandis que la matière est fixe dans les solides. Les problèmes relatifs aux forces électriques étaient donc beaucoup plus complexes que ceux relatifs aux forces d'attraction gravitationnelle, même si les outils mathématiques forgés pour les seconds sont aussi indispensables pour les premiers.

Considérant l'électricité comme un fluide, impondérable certes, mais cependant incompressible, Poisson utilise la démonstration de Laplace du fait que « la force répulsive (de l'électricité à la surface d'un conducteur en équilibre) est partout proportionnelle à son épaisseur » ¹² pour calculer la répartition de l'électricité à la surface d'un ellipsoïde isolé et peu différent d'une sphère (étude que Laplace avait déjà commencée). Il résout aussi le problème de deux sphères chargées dans les deux cas particuliers où elles sont soit en contact, soit à grande distance l'une de l'autre. Lorsque les deux

9 A. LIBES, *Traité élémentaire de physique*, 1801, t. III, p. 266-292, ouvrage d'enseignement courant à l'époque et recommandé par Ampère en 1804 : « Je ne connais point d'ouvrage sur la physique où l'électricité et surtout le galvanisme soient traités convenablement. La meilleure physique moderne est celle de Libes en 3 volumes in 8e ». (*Correspondance du grand Ampère*, t. III, 1943, p. 849). i

10 Cf. I.B. COHEN « Conservation and the concept of electrical charge : an aspect of philosophy in relation to physics in the 19th century » dans *Critical problems in the history of science*, ed. by M. Clagett (1959).

11 J.B. BIOT, *Traité de physique expérimentale et théorique*, 1816, t. II, p. 313.

12 S. POISSON, « Mémoire sur la distribution de l'électricité la surface des corps conducteurs » (lu les 9 mai et 3 août 1812) publié dans *Mémoires de la classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut de France*, 1811, t. 12, p. 1-92, 163-274.

sphères sont à une distance quelconque, la solution est un développement en série et Poisson en donne des valeurs approchées dans quelques cas particuliers.

Dans ce « Mémoire sur la distribution de l'électricité à la surface des conducteurs », Poisson utilise le potentiel introduit par Lagrange en 1777¹³, sans lui donner de nom ni le relier à aucune grandeur mesurable.

Il généralise l'équation donnant ce potentiel dans le vide $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$, utilisée par Laplace

dès 1782, au cas du potentiel en un point où se trouve une densité de charge électrique

$p : \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = - \frac{\rho}{\epsilon_0}$, et fournit ainsi à l'électricité une base mathématique newtonienne aussi parfaite

que celle de l'attraction universelle¹⁴.

Le jugement que Poisson porte en 1824 sur son propre travail peut être répété aujourd'hui : « les résultats du calcul se sont trouvés parfaitement d'accord avec les nombreuses expériences que Coulomb a faites, il y a près de quarante ans, sur cette matière ; et maintenant cette partie de l'électricité où l'on suppose les deux fluides en repos (...) est complète, ou du moins elle ne présente plus que des difficultés d'analyse relatives à la forme et au nombre des corps soumis à leur influence mutuelle »¹⁵

La seule modification ultérieure importante subie par l'électrostatique de Poisson fut en effet le remplacement des couches électriques d'épaisseur finie par des couches superficielles.

Ces succès mathématiques de Poisson et Laplace dans l'établissement de la théorie newtonienne de l'électricité, eurent un retentissement important sur l'attitude vis-à-vis de la réalité substantielle des fluides électriques. Pour montrer cette importance, il suffit de comparer deux jugements de J.B. Biot écrits l'un avant 1812 et l'autre quatre ans après :

« Les véritables physiciens admettent la considération de ces fluides comme une hypothèse commode, à laquelle ils se gardent bien d'attacher des idées de réalité et qu'ils sont prêts à modifier ou à abandonner entièrement dès que les faits s'y montreront contraires »¹⁶; alors qu'en 1816, après avoir décrit les travaux de Poisson, il écrit :

« Maintenant, si l'on considère combien cette théorie embrasse de phénomènes variés (...), comme elle les représente avec exactitude (...), on conviendra qu'elle est une des mieux établies de la physique, et qu'elle donne à l'existence réelle des deux fluides électriques le plus haut degré de probabilité, pour ne pas dire une certitude entière »¹⁷.

4. Le magnétisme

Si le magnétisme n'a pas bénéficié au début du 19^e siècle, d'une mathématisation aussi élaborée que celle de l'électricité, c'est essentiellement à cause de la faiblesse de ses fondements théoriques. L'existence des deux fluides « austral » et « boréal » ne repose pas d'un avis général « sur des preuves aussi plausibles que celles qui attestent l'existence du fluide électrique »¹⁸.

13 LAGRANGE, « Remarques générales sur le mouvement de plusieurs corps qui s'attirent mutuellement en raison inverse des carrés des distances », dans *Nouveaux mémoires de l'Académie de Berlin*, année 1777, publiés en 1779, p. 155-174.

14 « L'équation de Poisson » apparaît dans « Remarques sur une équation qui se présente dans la théorie des attractions des sphéroïdes » (*Nouveau Bulletin de la Société Philomatique de Paris*, vol. III, 1813, p. 388-392) mais, ce n'est qu'en 1824 dans son « Mémoire sur la théorie du magnétisme » que le théorème est complètement démontré.

15 « Mémoire sur la théorie du magnétisme », dans *M.A.R.S.*, 1821 et 1822, édité en 1826, p. 247 (mémoire lu le 2 février 1824).

16 J.B. BIOT, extrait du *Mercur de France*, 1809, reproduit dans *Mélanges scientifiques et littéraires*, t. II, 1858, p. 113-114.

17 *Traité de physique expérimentale et théorique*, t. II 1816, p. 312.

18 A. LIBES, *Traité élémentaire de physique*, 1801, t. III, p. 344. t

Pour Poisson lui-même, « les preuves que (Coulomb) a données (de la loi en raison inverse du carré des distances) et qui sont incontestables pour l'électricité, sont loin d'être aussi concluantes par rapport au magnétisme »¹⁹. Ce n'est qu'en 1824 qu'il tente pour le magnétisme l'entreprise réalisée une dizaine d'années auparavant pour l'électricité. Ce « Mémoire sur la théorie du magnétisme » de Poisson a été lu quatre ans après la découverte de l'électromagnétisme par Ørsted, en 1820, alors qu'Ampère avait déjà donné l'essentiel de sa théorie. Il était destiné à affermir la théorie magnétique de Coulomb face à celle d'Ampère, mais il eut beaucoup moins d'influence que son mémoire sur l'électricité, et Poisson resta quelque peu en dehors du nouveau courant.

Comme ce mémoire est dans le prolongement de celui sur l'électricité et qu'il est dans la plus stricte tradition newtonienne, nous allons rapidement l'évoquer. Le but du mémoire est ainsi posé : « le principal problème que nous avons eu à résoudre, a été de déterminer en grandeur et en direction la résultante des attractions ou répulsions exercées par tous les éléments magnétiques d'un corps aimanté, de forme quelconque, sur un point pris en dehors ou dans son intérieur »²⁰.

La différence la plus importante entre les fluides électriques et les fluides magnétiques se situe dans leur rapport avec la matière pondérable. Tandis que les fluides électriques circulent librement au sein des conducteurs, les fluides magnétiques sont retenus dans chaque molécule de métal aimanté. Dans l'acier, la matière entourant chaque élément magnétique agit sur les fluides opposés et séparés pour les empêcher de se recombiner : cette force est appelée « coercitive » par Poisson. Dans le fer doux, la force coercitive est nulle puisque l'aimantation disparaît lorsque l'aimant qui en était la cause s'éloigne. Cette importance de la structure interne de la matière dans la théorie magnétique est un problème qui ne se pose pas dans la théorie électrique où seule la géométrie des corps joue un rôle.

Ne pouvant préciser le lien entre la structure du corps à l'échelle moléculaire et ses propriétés magnétiques, Poisson se restreint au cas du fer doux, pour lequel la force coercitive est nulle. Il montre que dans ce cas l'action magnétique est équivalente à celle d'« une couche de fluide d'une très petite épaisseur qui recouvrirait la surface entière », et applique l'équation générale obtenue au cas d'une sphère. Ses résultats sur l'action magnétique d'une sphère de fer doux aimantée par influence sont compatibles avec les expériences faites par Barlow en 1824, expériences qui sont même pour Poisson « une confirmation remarquable de la théorie du magnétisme » qu'il vient d'élaborer. Cependant, ce mémoire venait quelques années trop tard et bien qu'il contienne des théorèmes encore utilisés aujourd'hui, marqua peu son époque.

L'œuvre de Coulomb et Poisson fut largement soutenue et diffusée en France par J.B. Biot, en particulier dans son *Traité de physique expérimentale et théorique* (1816), ouvrage qui fit autorité dans l'enseignement avec le traité de Haüy qui, moins mathématique, défendait les mêmes théories. Biot avait lui-même travaillé avec Coulomb au cours de ses dernières recherches et grâce « à l'amitié dont (celui-ci) l'honorait » disposait d'un certain nombre de ses manuscrits inédits : il se considérait comme l'héritier de cette tradition scientifique représentée par Coulomb²¹. Si d'ailleurs pendant toute la première moitié du 19^e siècle des doutes sont émis sur la réalité de l'existence des fluides impondérables par les physiciens ou les chimistes (car l'électricité fait encore parfois partie

19 S. POISSON, « Mémoire sur la théorie du magnétisme », dans *M.A.R.S.*, 1821 et 1822, édité en 1826, p. 248

20 *Ibid.*, p. 259.

21 J.I. BIOT, *Traité de physique expérimentale et théorique*, t. III, p. 117. Sur les manuscrits de Coulomb qu'il a possédés, t.II p. 244, 273, 277, 351.

de la chimie)²², aucun cependant ne refuse l'expression des lois des actions électriques et magnétiques, telles qu'elles ont été prouvées par Coulomb et développées par Poisson.

5. Conséquences des succès newtoniens

Le parallélisme entre l'électricité et le magnétisme dans la théorie de Coulomb est souligné avec emphase, par Biot en 1819 : « We may remark that there exists the most complete, the most perfect, and the most ultimate analogy between the laws of the two magnetic principles and those of the two electrical principles »²³.

La force de ce parallélisme s'accroît encore de l'analogie avec la toute-puissante théorie de l'attraction universelle.

Cette apparence séduisante d'unité formelle entre les trois branches de la physique : gravitation, électricité et magnétisme fut, en tout cas à Paris, un des plus forts arguments contre l'introduction d'une nouvelle théorie du magnétisme. Haüy note ainsi en 1821 que « les théories de l'électricité et du magnétisme, telles que les ont adoptées jusqu'ici les physiciens, sont démontrées sans retour par l'accord du calcul avec l'observation, et elles le sont d'autant mieux *qu'elles se vérifient mutuellement par l'identité des lois* auxquelles les deux fluides obéissent »²⁴. De même pour Biot l'hypothèse d'Ampère est mauvaise car elle « est d'abord en elle-même complètement hors des analogies que nous présentent toutes les autres lois d'attraction »²⁵.

Le renforcement réciproque des différentes branches de la physique newtonienne, par la similitude de leur formulation mathématique, contribua en outre à créer le sentiment que les sciences physiques avaient acquis des fondements inébranlables.

Ainsi Biot, évoquant les nouvelles découvertes faites entre 1817 et 1821, écrit-il :

« Les nouvelles richesses acquises par la science ont toutes trouvé leur place dans les grandes divisions déjà établies et les découvertes même les plus éloignées des faits déjà connus, se sont insérées parmi eux ou à leur suite, sans déranger les rapports par lesquels ils étaient déjà liés.

« Tel est le caractère d'une science faite ; ce qui ne veut pas dire limitée et finie, *mais stable et impossible à renverser*, parce qu'elle est fondée sur les rapports directs et numériques des résultats entre eux (...). La progression rapide avec laquelle (la physique) se complète tous les jours peut faire regarder l'époque de sa stabilité entière comme peu éloignée de nous »²⁶.

Ce sentiment de science achevée, qui rappelle celui que ressentait Lagrange vis-à-vis des mathématiques à la fin du 18^e siècle, ne fut pas sans conséquence sur l'orientation ultérieure de la recherche. Pour J.B. Dumas qui en juge cinquante ans plus tard, et qui était tout jeune homme en 1820, « ce moment est plein d'intérêt pour l'histoire des sciences (...) car il marque la fin d'une grande école et l'apparition d'une ère nouvelle. Le succès avec lequel les phénomènes célestes avaient été soumis au calcul avait fait illusion (...). La chaleur, la lumière, l'électricité, le magnétisme, considérés comme autant de matières impondérables distinctes ; les propriétés des corps pesants, tout était

²² Ainsi le cours de chimie de Brande et Faraday à la Royal Institution en 1826 contient l'électricité, ainsi d'ailleurs que la chaleur et la géodésie, sciences qui sont, soit des préalables, soit des applications à l'étude de la chimie (*Quarterly Journal of Science*, t. 20, 1826, p. 203). Encore en 1840 T. Thomson souligne que si en France il existe une chaire de physique (chaleur, lumière, électricité, magnétisme), en Grande-Bretagne ces matières sont enseignées par le professeur de chimie (*On heat and electricity*, London, 1840, p. 74).

²³ J.B. BIOT, article « Magnetism », dans *Edinburgl, Encyclopaedia*, vol XIII, 1819, p. 277.

²⁴ HAÜY *Traité élémentaire de physique*, 3^e éd., 1821, t. II, p. 142.

²⁵ J.B. BIOT, *Précis élémentaire de physique expérimentale*, 3^e éd., 1824, t. II, p. 771.

²⁶ J.B. BIOT, *Précis élémentaire de physique expérimentale*, 3^e éd., 1824, t. I, p. XI.

rangé sous des lois énoncées avec une autorité mathématique si ferme, qu'on se sentait découragé de rien entreprendre, comme si la science eut prononcé son dernier mot »²⁷.

La force des analogies, l'autorité mathématique et le sentiment d'être face à un édifice « stable et impossible à renverser » ne furent pas les seuls obstacles qu'opposèrent les théories newtoniennes à toute nouvelle théorie de l'électricité et du magnétisme. Il faut encore y ajouter l'indépendance totale entre les phénomènes électriques et les phénomènes magnétiques : un physicien « sérieux » ne saurait chercher une action réciproque entre magnétisme, électricité, gravitation, lumière et chaleur. Il y a indépendance d'action et indépendance de cause.

La seule action de l'électricité sur le magnétisme connue à l'époque était celle de la foudre sur 'les aiguilles aimantées dont elle pouvait renverser les pôles et sur les objets métalliques qu'elle pouvait aimanter. Mais pour un physicien comme Biot cette action est une action *mécanique* : « it is proved that every piece of iron which has suffered any friction becomes magnetic, and (...) an electrical discharge, *acting like a blow*, develops magnetism in iron wires through which it is made to pass. From the same cause, lightning produces a similar effect upon the mariner's needle, and sometimes even reverses its poles »²⁸. Il refuse toute possibilité d'une action directe des fluides électriques sur les fluides magnétiques²⁹.

Cette indépendance totale entre les phénomènes électriques et magnétiques explique le jugement porté par Ampère le 21 février 1821, soit quelques mois après l'annonce de la découverte d'Ersted : « Il est inconcevable qu'on n'ait pas essayé, il y a 20 ans, l'action de la pile voltaïque sur l'aimant. Cependant je crois qu'on peut en assigner la cause : elle est dans l'hypothèse de Coulomb sur la nature de l'action magnétique »³⁰.

II. LE VOLTAÏSME

Au contraire de l'électricité et du magnétisme, le voltaïsme n'a reçu en 1820 ni explication physique ni formalisation mathématique reconnues de tous. Nous allons examiner les connaissances expérimentales et les explications théoriques disponibles aux physiciens de 1820, afin de mieux comprendre comment l'électromagnétisme va s'insérer dans cet ensemble de connaissances.

La pile, réalisée par Volta en 1800, et rapidement reproduite dans tous les laboratoires européens, a suscité de très nombreuses recherches expérimentales menées d'abord pour déterminer les effets du fluide galvanique mis en œuvre dans cette pile et les comparer à ceux du fluide électrique ordinaire. Avant de rappeler ces expériences galvaniques, il convient d'insister sur le fait qu'en 1800, l'électricité « ordinaire » était celle des étincelles, des commotions qu'on éprouve lorsqu'on touche les deux pôles d'une batterie (sous-entendu de bouteilles de Leyde), des *décharges* d'une manière plus générale. C'était donc un phénomène par essence discontinu, bref et souvent violent. Ce caractère de violence est d'ailleurs pour Haüy une différence de plus entre électricité et magnétisme : « l'électricité se manifeste aux yeux par des jets de lumière, par de bruyantes étincelles ; le magnétisme agit paisiblement et en silence »³¹.

27 J.B. DUMAS, *Discours et éloges académiques*, 1885, t. I, Eloge de Faraday, p. 74.

28 J.B. BIOT, article « Magnetism », dans *Edinburgh Encyclopaedia*, t. XIII, 1819, p. 250.

29 Pour un physicien newtonien, cette hypothèse est du même ordre que celle qui attribue la gravitation à des forces magnétiques.

30 *Correspondance du grand Ampère*, L. DE LAUNAY, t. II, 1936, p. 566.

31 HAÜY, *Traité élémentaire de physique*, 3^e éd., 1821, p. 135.

I. Les résultats des expériences galvaniques

Volta ayant affirmé que le fluide galvanique mis en jeu dans sa pile n'était autre que le fluide électrique ordinaire ³², les physiciens tentent de reproduire avec la pile les effets produits par les machines électriques. Or les machines électriques à frottement montrent deux sortes d'effets : des attractions et répulsions électrostatiques d'une part et des décharges produisant des effets différents suivant les corps qu'elles traversent d'autre part.

Attractions et répulsions :

Elles s'obtiennent très facilement en reliant un électroscope à l'un des pôles de la pile. Rapportons une de ces expériences en détail, celle de N. Gautherot en 1801, car en 1820 les adversaires d'Ampère tentèrent de réduire son expérience fondamentale sur l'attraction de deux courants électriques à cette expérience de Gautherot :

« J'ai arrêté sur l'extrémité supérieure de la pile le bout d'une corde de clavecin bien fine, laissant flotter le reste de la corde dans l'air. J'ai placé de même à l'autre extrémité de la pile un autre fil métallique, et présentant le bout libre de celui-ci à celui du premier fil, j'ai aperçu un mouvement de ce premier vers le deuxième, et lorsque les deux fils ont pu se toucher, il y a eu une adhésion très marquée : *ils semblaient unis comme par une force magnétique* » ³³.

Cette dernière phase explique la confusion régnant en 1820 au sujet d'un ensemble d'expériences mettant en jeu les unes des forces purement électrostatiques et les autres, celles d'Ampère, des forces électromagnétiques. On comprend alors mieux l'insistance avec laquelle ce dernier souligne que « ces attractions et répulsions (qu'il vient de découvrir entre les courants) diffèrent essentiellement de celles que l'électricité produit dans l'état de repos » ³⁴.

Que deviennent ces forces d'attraction et de répulsion lorsque les deux pôles de la pile sont reliés par un conducteur ? Même avec des appareils sensibles, P. Erman, comme la plupart de ceux qui étudient la pile, trouve que :

« Tant que le cercle galvanique demeure fermé par la réunion des deux pôles, il n'y a aucun effet électroscopique, même en mettant le pôle opposé à l'électromètre en communication parfaite avec le sol » ³⁵,

En fait la tension aux bornes d'une pile de l'époque, de forte résistance interne, devenait très faible lorsqu'on reliait ses pôles par un conducteur métallique de faible résistance ³⁶

Mais la nature même du programme de recherche, résumé en ces termes par J. Ritter : réaliser « un très grand nombre d'expériences qui prouvent que la *tension de la pile suit partout les*

³² «Le fluide galvanique n'est autre chose que le fluide électrique commun, et (...) ce fluide est incité et mu par le simple contact des conducteurs différents». *Journal de physique*, t. 53, 1801, p. 309. Voir aussi « On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds », dans *Philosophical Transactions*, t. 90, 1800, p. 403.

³³ *Annales de Chimie*, t. 29, an IX, p. 209.

³⁴ *Annales de chimie et de physique*, t. 15, 1820, p. 70.

³⁵ « Sur les phénomènes électrométriques de la colonne de Volta », *Journal de Physique*, t. 53, 1801, p. 126.

³⁶ Si E est la force électromotrice de la pile, r sa résistance interne, et R la résistance du conducteur, la différence de potentiel U aux bornes de la pile est :

$$U = E - rI = E - r \frac{E}{r + R} = E \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}$$

U est négligeable devant E lorsque r est grande devant R .

L'ARRIÈRE-PLAN CONCEPTUEL ET EXPÉRIMENTAL

mêmes lois que celle qui est produite par la machine électrique »³⁷ amena les physiciens à admettre la nullité de tension aux bornes de la pile en circuit fermé. En effet, l'analogie avec une batterie électrique ou bouteille de Leyde était alors complète : lorsque la pile est isolée, elle reproduit les forces électriques à distance exercées par la batterie électrique et lorsque ses pôles sont reliés, elle se décharge et ne manifeste plus de propriétés électriques.

La nullité de la tension aux bornes de la pile en circuit fermé devint un principe général de la théorie qu'Ampère lui-même reprend dans son mémoire de 1820³⁸.

Les décharges produites par la pile :

Les premières décharges produites par le fluide galvanique, à savoir les commotions au travers de corps organiques, se manifestèrent avant même la construction de la pile par Volta puisque ce sont les contractions de cuisses de grenouilles entre deux métaux différents qui révélèrent à Galvani le nouveau phénomène.

Une fois la pile à la disposition des expérimentateurs, ce furent toutes les parties du corps, sain ou malade, qui bénéficièrent des secousses provoquées par le passage du fluide ! Ces décharges électriques entre différents points du corps, effectuées dans un but thérapeutique, remplissent les mémoires de l'époque. En effet, si la seule application concrète de l'électricité statique avait été le paratonnerre, le seul espoir d'utilisation de l'électricité voltaïque était d'ordre médical. Le laboratoire de l'Ecole de Médecine de Paris possédait d'ailleurs la pile la plus puissante de Paris, après celle accordée par Napoléon à l'Ecole Polytechnique. La conclusion de ces expériences douloureuses fut que la commotion produite par la pile semble plus faible que celle de la bouteille de Leyde car « la première est modifiée par le mouvement progressif et continu du fluide qui, au lieu de frapper les organes d'un seul coup, comme dans l'expérience de Leyde les attaque par une succession rapide de petites impulsions »³⁹ A part cette différence d'intensité, les effets étaient les mêmes.

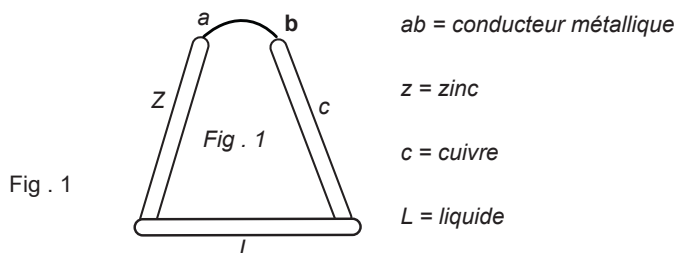
Plus importantes pour la suite sont les expériences de décharges de la pile entre deux pointes de métal ou de charbon⁴⁰ : elles produisent les mêmes étincelles, la même lumière que l'électricité ordinaire, les effets étant toutefois également plus faibles. Autres propriétés communes : la rapidité des décharges et la nature commune des corps qui les conduisent.

37 *Journal de Physique*, t. 57, 1804, p. 402 (Mémoire présenté à l'Institut par H.C. ØRSTED). Souligné dans le texte.

38 « Mais lorsque les deux corps(...) entre lesquels l'action électro-motrice a lieu sont d'ailleurs en communication par des corps conducteurs (...) les tensions (entre ces corps) disparaissent ou du moins deviennent très petites ». *Annales de Chimie et de Physique*, t. 15, 1820, p. 63.

39 HAÛY, *Traité élémentaire de Physique*, 3^e éd. 1821, p. 52.

40 Il faut noter que ce que nous appelons aujourd'hui arc électrique, c'est-à-dire une décharge électrique continue dans l'air, désignait à l'époque l'ensemble [1^{er} métal-conducteur humide - 2^e métal] refermé sur lui-même par un conducteur métallique. Cette dénomination provient de la disposition des diverses parties du circuit : Ørsted représente ainsi « l'arc galvanique » :



(Bibliothèque Universelle, sciences et arts, t. 15, 1820, p. 137).

Les seules expériences faisant fonctionner la pile de façon continue étaient les décharges à travers des liquides : décomposition de l'eau, des solutions salines, puis de la soude et la potasse par H. Davy en 1806. Cette nouvelle propriété que présentait le fluide galvanique par rapport au fluide électrique de détruire les affinités chimiques fut d'abord un argument contre l'identité des deux fluides. Mais après qu'on eut connu l'électrolyse de l'eau réalisée avec des étincelles provenant d'une machine électrique à frottement par Van Marum puis Wollaston, l'identité entre les deux fluides fut acceptée par la plupart des physiciens ⁴¹. Cette thèse de l'identité bénéficiait en outre de l'appui de l'autorité de Volta.

On a donc conclu de la comparaison des effets des deux fluides électrique et galvanique que, comme le note Haüy, « la ressemblance des effets indique l'identité des causes » ⁴². Ainsi pour Thénard, la pile ne serait qu'« une bouteille de Leyde qui aurait la propriété de se recharger d'elle même aussitôt qu'elle serait déchargée » ⁴³. De même pour Faraday, lorsqu'on en relie les pôles, « the battery is discharged », et elle ne retrouve son état de tension que lorsqu'on retire le conducteur.

Si la séparation des fluides a une origine différente dans les deux appareils, leur fonctionnement est identique.

Les phénomènes produits par la pile étant toujours comparés à ceux de la bouteille de Leyde, nous comprenons que cette dernière ait servi de modèle analogique pour une explication théorique du fonctionnement de la pile.

2. Les essais d'interprétation électrostatique de la pile

Les nouveaux phénomènes voltaïques ayant été classés parmi les phénomènes électriques, c'est une explication électrique, c'est-à-dire *électrostatique*, qu'il fallait trouver au fonctionnement de la pile voltaïque. C'était d'ailleurs la voie qui apparaissait la plus sûre et la plus naturelle depuis que l'électricité avait reçu forme mathématique avec Coulomb.

L'analogie entre la pile et une batterie de condensateurs fournit la première théorie : la théorie du contact de Volta reprise et développée par Biot. Mais une analogie électrostatique différente fut utilisée par Ørsted, qui considéra le phénomène de l'électrisation par influence comme fondement de sa théorie.

La théorie du contact :

Les explications de Volta lui-même étaient assez succinctes et assez vagues ⁴⁴ : le seul contact de deux plaques de zinc et de cuivre provoquerait une accumulation de fluide positif dans le zinc et de fluide négatif dans le cuivre. Le fluide électrique ainsi mis en mouvement de part et d'autre de la jonction traverserait les plaques de carton humide accolées de part et d'autre des deux plaques métalliques et recevrait une nouvelle impulsion à la jonction du couple zinc-cuivre suivant. Dans ce mécanisme, l'eau acidulée humidifiant le carton joue uniquement un rôle de conducteur

⁴¹ Cependant le problème est encore considéré comme ouvert quelque trente ans plus tard puisque Faraday rédige en 1833 un mémoire destiné à prouver définitivement l'identité de toutes les électricités, quelles que soient leurs origines. (*Experimental Researches in Electricity*, series III, mémoire lu les 10 et 17 janvier 1833).

⁴² HAÜY, *Traité élémentaire de physique*, 3^e éd., 1821, p. 52.

⁴³ THENARD, *Traité de chimie*, 1813, p. 89, cité par T. BROWN, « The electric current in early 19th french physics », dans *Historical studies in physical sciences*, vol. I, 1969, p. 79.

⁴⁴ « On the electricity excited by the contact of conducting substances of different kinds », dans *Philosophical Transactions*, t. 90, p. 403-431 et « Sur les phénomènes galvaniques », dans *Journal de Physique*, t. LIII, 1801, p. 309-316.

L'ARRIÈRE-PLAN CONCEPTUEL ET EXPÉRIMENTAL

C'est seulement après que la Commission nommée par l'Institut pour faire un rapport sur cette théorie du contact (présentée par Volta lui-même devant l'Institut en décembre 1801) eût pris le parti de Volta face à ses détracteurs, que sa théorie prévalut dans la plus grande partie de l'Europe.

Ce rapport fut rédigé par Biot ⁴⁵, alors jeune physicien de 27 ans, mais Coulomb et Laplace, ses deux maîtres à penser, faisaient partie de la commission et l'ont sans doute largement influencé. Biot y étudie la répartition des charges électriques à l'intérieur de la pile *isolée*, c'est-à-dire en circuit ouvert. C'est donc un problème statique qu'il résout avec les hypothèses suivantes : la différence de quantité d'électricité entre les deux plaques (zinc et cuivre) d'un même couple est constante par exemple +1) et celle entre deux plaques du même métal séparées par du carton est nulle. Comme le souligne T. Brown ⁴⁶, l'impulsion évoquée par Volta ainsi que « le mouvement perpétuel du fluide électrique », ont disparu au profit de forces purement électrostatiques.

Une dizaine d'années plus tard, dans son *Traité de physique expérimentale et théorique*, Biot reprend sa théorie de la pile et insiste de nouveau sur le fait que « les couches humides interposées entre les disques métalliques *n'ont sur eux qu'une force électromotrice absolument insensible*, et qu'en outre elles n'opposent aucun obstacle à la transmission de l'électricité dans l'intérieur de l'appareil » ⁴⁷. Si pour généraliser la théorie on suppose que les conducteurs humides ont une conductibilité imparfaite, alors la réunion des deux pôles de la pile par un conducteur produit « une décharge momentanée dans laquelle toute l'électricité passera librement, comme lorsqu'un corps électrisé se décharge par étincelle à travers l'air ; après quoi chaque couple métallique se remettra instantanément dans l'état électrique déterminé par la force électromotrice des pièces qui le composent » ⁴⁸. Mais la communication avec les autres couples étant imparfaite, il faudra à la pile un certain temps pour se recharger. C'est là la seule différence avec l'hypothèse d'une conductibilité parfaite et ne modifie pas « la continuité des décharges successives qui s'opèrent quand la communication est établie entre les deux pôles » ⁴⁹.

' La pile en circuit fermé est donc réduite à une bouteille de Leyde qui se décharge pour se recharger presque instantanément grâce à la force électromotrice située au contact zinc-cuivre. Le phénomène fondamental est l'état de la pile *avant* qu'elle ne se décharge, c'est-à-dire lorsqu'elle n'est pas encore fermée par un conducteur.

Cette théorie du contact a dominé surtout en France et en Italie, sans doute à cause de l'influence de l'autorité scientifique de Coulomb et Volta, ainsi que des traités de Biot et Haüy. En Grande-Bretagne nous verrons que les oppositions à cette théorie, venues essentiellement de chimistes, ne se sont pas faites aussi facilement. Mais voyons d'abord la deuxième interprétation électrostatique de la pile, celle d'Ersted.

La théorie ondulatoire d'Ersted

Elle est assez peu connue, mais il est important de la présenter car si Ampère s'est d'abord réclamé de la théorie de Volta en 1820 (dans sa forme initiale, non remaniée par Biot), il s'est fortement inspiré de celle d'Ersted dans sa conception du courant électrique en 1821.

45 *Mémoires de la Classe des Sciences mathématiques et physiques de l'Institut*, t. v, 1804, p. 195.

46 T. BROWN « The electric current in early 19th century french physics », dans *Historical studies in physical sciences*, vol. I, 1969, p. 61-103.

47 J.B. BIOT, *Traité de physique expérimentale et théorique*, t. 2, 1816, p. 477.

48 *Ibid.*, p. 516.

49 *Ibid.*, p. 524.

En 1806, c'est le « mécanisme interne de la propagation de l'électricité »⁵⁰, dans l'arc galvanique (c'est-à-dire le circuit fermé, voir note 40), plus que la structure électrique de la pile isolée qu'Ørsted cherche à expliquer. Il pose donc le problème sous forme dynamique et non pas statique comme Biot. Dans son mémoire « Sur la propagation de l'électricité », il rapproche le mouvement de l'électricité dans le conducteur lié à la pile de celui qui se produit lors de la charge d'un corps neutre par l'influence d'un corps chargé. Pour lui, dans les deux cas, c'est une « polarisation » qui se propage. Soit A le corps chargé, positivement par exemple. Soit BC le corps neutre, qui sous l'influence de A voit apparaître une charge - en B et une charge + en C (fig. 2). D'après Ørsted, « l'électricité

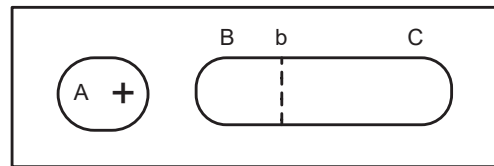


FIG 2

ne peut communiquer depuis B jusqu'à C sans employer un temps quelconque » : l'électricité + de A attire une charge - en B, ce qui laisse une charge opposée + en un point intermédiaire *b*. Puis « la zone positive en *b* cherchera à en établir une négative plus loin vers C »⁵¹. Ainsi, tandis que la zone négative s'allonge en B, une alternance + et -- se propage le long de BC jusqu'à ce que la charge positive ait atteint l'extrémité C.

Ørsted souligne qu'« on doit imaginer le procédé *continu* ». Il croit voir des preuves expérimentales de cette propagation dans la répartition des charges à la surface d'un mauvais conducteur qui présente à la fois des zones positives et négatives, dans la fusion d'un fil de fer reliant les deux pôles d'une pile et qui montre plusieurs points de fusion séparés de zones non fondues (en fait, ceci est dû aux irrégularités du fil qui fond aux endroits de plus petite section), et enfin dans la « volatilisation » de ce même fil si la batterie est assez puissante. Dans cette dernière expérience, la projection des « vapeurs métalliques » sur un papier donnerait « un portrait coloré de *l'expansion oscillatoire de l'électricité* ».

Il ajoute encore que « tout ce qu'on a dit jusqu'ici de l'électricité doit être également appliqué au magnétisme. L'action de l'aimant commence par une polarisation, et doit par conséquent se communiquer *ondulatoirement* comme l'électricité ». L'existence des points conséquents (c'est-à-dire des pôles alternativement N et S) lors de l'aimantation d'une barre de fer par simple touche prouve pour Ørsted l'identité entre la propagation de l'aimantation et celle de l'électrisation par influence.

Il conclut de manière encore plus globale : « Ce mécanisme de l'action de la propagation ondulatoire est sans doute général dans toute la nature, mais il est très difficile de le démontrer ».

Cette première conception du conflit électrique « dans le milieu du fil, on aura un parfait équilibre des forces contraires » est reprise dans son ouvrage de 1813, *Recherches sur l'identité des forces chimiques et électriques*:

« L'électricité ne découle donc pas par les conducteurs, comme un liquide par un canal, mais elle se répand par une sorte de décomposition et de recombinaison continuelles (...). On pourrait

⁵⁰ *Journal de Physique*, t. 62, 1806, p. 369.

⁵¹ *Ibid.*, p. 370.

exprimer cette succession de forces opposées, qui existe dans la transmission de l'électricité, en disant que *l'électricité se répand toujours d'une manière ondulatoire* »⁵².

L'ambition d'Ersted d'aboutir à une physique unifiée à l'aide d'un mode de propagation unique est ici manifeste.

Les deux interprétations électrostatiques du fonctionnement de la pile, celle de Biot et celle d'Ersted ne font donc apparaître ni l'une ni l'autre la notion de circulation continue ou de débit : le phénomène est discontinu pour le premier et continu mais ondulatoire pour le second. C'est seulement dans les interprétations électrochimiques que cette notion apparaît.

3. Les interprétations électrochimiques de la pile

Les effets chimiques de l'électricité voltaïque ont été observés dès la réalisation des premières piles. En effet, l'annonce de la découverte de l'électrolyse de l'eau par Nicholson et Carlisle parvint à la Royal Society avant même la deuxième partie de la lettre de Volta annonçant sa propre découverte de la pile.

C'est alors que selon P. Sue, le premier historien de cette nouvelle science, « le galvanisme qui paraissait n'intéresser que la physiologie, se transporte, pour ainsi dire dans le domaine de la chimie, et semble vouloir en ébranler les théories les plus nouvelles »⁵³.

L'action chimique du voltaïsme se manifestait d'une part dans la pile elle-même par une oxydation des plaques et d'autre part dans les liquides conducteurs par une décomposition chimique. Les électrolyses montraient la première interaction profonde entre un fluide impondérable et la matière pondérale. Elles forçaient à « reconnaître qu'il y a identité entre les attractions chimiques et électriques ou, en d'autres termes, qu'elles dépendent d'une même cause qui, dans un cas agit sur les masses, et dans l'autre sur les particules (de fluides électrique) »⁵⁴. Elles jouèrent d'ailleurs un rôle plus important en chimie que dans la théorie électrique elle-même.

Les oxydations au sein de la pile par contre amenèrent des critiques à la théorie de Volta. Pour lui, les phénomènes chimiques sont des « effets secondaires »⁵⁵. Mais tel n'est pas l'avis des physiciens et surtout des chimistes qui font de ces phénomènes chimiques l'objet principal de leur étude.

Déjà en 1792 Fabroni avait remarqué l'altération chimique des cuisses de grenouille placées entre deux métaux et avait attribué à des réactions d'oxydation les effets du soi-disant fluide galvanique. Il en voit la preuve dans le fait que « l'électricité agit toujours d'une manière instantanée, tandis que les effets des affinités chimiques durent autant qu'il existe des réactifs non saturés »⁵⁶.

Avec la pile, les réactions chimiques sont encore plus visibles et Gautherot s'attacha à montrer que ce sont ces réactions qui sont à l'origine des propriétés électriques de la pile. Mais c'est en Angleterre avec Wollaston et surtout Davy que cette thèse se développe. Davy parvint même à conclure de ses expériences que la force de la pile est en grande partie proportionnelle à l'affinité chimique du liquide pour la plaque de zinc et que l'électricité provient de la « dissolution » du métal dans

⁵² *Recherches sur l'identité des forces chimiques et électriques*, Paris 1813, traduction de M. de Serres, p. 130, passage souligné dans le texte.

⁵³ P. SUE, *Histoire du galvanisme*, 1802, t. II, p. 184.

⁵⁴ G. SINGER, *Éléments d'électricité et de galvanisme*, Paris, 1817, p. 388.

⁵⁵ « Lettre au professeur de la Méthérie sur les phénomènes galvaniques », dans *Journal de Physique*, t. 53, 1801, p. 310.

⁵⁶ « Sur l'action chimique des différents métaux entr'eux... », dans *Recueil périodique de littérature médicale étrangère*, t. II, an VII, p. 56.

l'acide. Ainsi, le liquide placé entre les couples zinc-cuivre n'intervient pas tant, comme le soutenait Biot, par sa faculté conductrice, que par son affinité chimique pour le zinc.

Mais ces résultats, confirmés par Gay-Lussac et Thénard dans leurs expériences sur la grande pile de l'Ecole Polytechnique, n'entamèrent pas la foi des partisans de la théorie de Volta. Ainsi, lorsque dans le même tome du *Journal de Physique* de 1801 on trouve à quelques pages d'intervalle l'affirmation du physicien berlinois P. Erman :

« Il est bien démontré que l'effet de la charge électrique se produit entre les faces des métaux qui sont séparées par le drap mouillé, et non point aux faces qui se touchent immédiatement »⁵⁷ et celle opposée de Volta :

« L'action excitant et mouvant le fluide électrique ne s'exerce pas, comme on l'a cru fausement, au contact de la substance humide avec le métal, où il ne s'en exerce qu'une très petite, qu'on peut négliger en comparaison de celle qui s'exerce, comme toutes mes expériences le prouvent, au contact des métaux différents »⁵⁷,
c'est l'opinion de Volta qui prévaut du moins en France et en Italie.

Cette différence d'opinion sur l'origine de la force électrique d'une pile amena d'ailleurs les tenants de chaque théorie à construire différemment leurs piles (fig. 3). Deux piles qui ont les mêmes métaux aux extrémités sont parcourues par des courants de sens contraires⁵⁸.

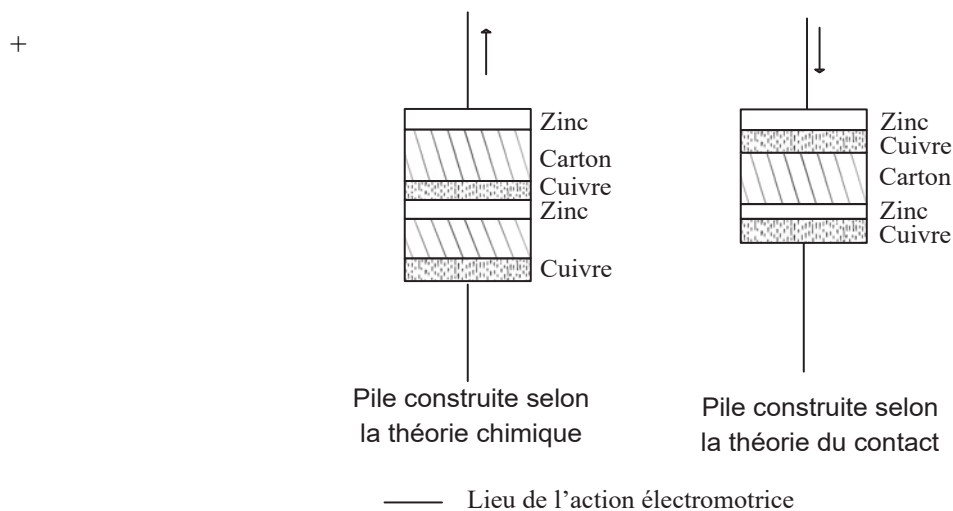


Fig. 3

En conclusion on peut souligner que, si en 1820, l'ensemble des savants s'accorde pour admettre que les propriétés de la pile voltaïque sont dues au fluide électrique ordinaire, par contre il n'y a pas de consensus sur la manière dont ce fluide est créé, mis en mouvement, et agit sur les conducteurs. Les chimistes insistent sur l'importance des liens entre l'énergie chimique et la puissance de la pile,

⁵⁷*Journal de Physique*, t. 53, 1801, p. 122.

⁵⁸ Ce problème est soulevé par exemple par GERSTED (*Bibliothèque Universelle*, sciences et arts, t. 15, 1820, p. 138) et par FARADAY (*Annales de Chimie et de Physique*, t. 18, 1827, p. 338).

tandis que les physico-mathématiciens français pensent avoir réduit les lois de la pile à celles de l'électrostatique.

La notion de circuit, fermé ou ouvert, est encore très floue puisqu'on affirme que lorsqu'on relie les extrémités de la pile par un conducteur, celle-ci est « déchargée ». On considère comme objet d'étude tantôt la pile, tantôt le conducteur, mais ils ne sont pas intégrés dans un même cadre explicatif.

Les concepts de courant et de tension sont presque inexistants puisqu'on ne sait pas s'il y a mouvement continu ou discontinu, ni comment se répartissent les charges électriques.

Mais il ne faut pas oublier que l'essentiel des expériences consiste en expériences de décharges, phénomènes discontinus, très difficiles à étudier et qui ne permettent pas d'élaborer une théorie de la conduction électrique. Même dans les phénomènes continus comme les électrolyses, les effets variaient avec le temps du fait de la polarisation rapide des piles.

Le sentiment de confusion qui règne dans ce domaine est ressenti par de nombreux physiciens. Ainsi pour G. Singer, si l'électricité est « source féconde de découvertes » utiles, comme par exemple la découverte du sodium et du potassium grâce à l'électrolyse, par contre, l'absence « d'un principe général simple » ralentit l'ardeur des physiciens dans l'étude théorique des phénomènes ⁵⁹.

III. LES RECHERCHES DE LIENS ENTRE ÉLECTRICITÉ, MAGNÉTISME ET VOLTAÏSME

1. Les liens électricité « ordinaire »-magnétisme

Si nous avons souligné dans le premier paragraphe l'indépendance rigoureuse entre les phénomènes électriques et magnétiques dans la théorie newtonienne, il n'a cependant pas manqué d'esprits, au cours du 18^e siècle, pour trouver une origine commune à ces phénomènes. Ainsi, par exemple, pour le physicien anglais A. Walker qui donnait des cours publics très suivis, « the identity of fire, light, heat, caloric, phlogiston and electricity or rather their being but modifications of one and the same principle » est le problème principal à étudier.

Selon lui, l'origine commune de ces effets réside dans le soleil et la lumière qu'il nous envoie. Mais sa théorie, comme toutes les spéculations de ce genre émises à cette époque, procède surtout par interrogations : « Electricity excites to more vigorous exertion the living principle of both plants and animals ; excites quicker motion in fluids (...) and may it not excite that latent, though inherent, principle of magnetism in iron ? » ⁶⁰.

Cependant, à côté de ce type de spéculations, il existait un phénomène naturel et bien connu reliant électricité et magnétisme : l'action de la foudre. En effet, même si l'importance accordée à cette action plus proche des « curiosités de la nature » que des phénomènes physiques a été accrue rétrospectivement après la découverte de l'électromagnétisme, elle était familière aux physiciens. Parmi la multitude de témoignages à ce sujet, citons celui d'Arago un an avant la découverte de l'électromagnétisme : dans *'Annuaire du Bureau des Longitudes* de 1819 il annonce « avoir été témoin qu'un bâtiment génois qui faisait route pour Marseille, étant à peu de distance d'Alger, fut frappé par la foudre, qui fit faire aux aiguilles des boussoles une demi-révolution, et que le bâtiment vint se briser à la côte au moment où le pilote croyait avoir le cap au nord » ⁶¹. De même

⁵⁹ G. SINGER, *Eléments d'électricité et de galvanisme*, Paris, 1817.

⁶⁰ A. WALKER, *A system of familiar philosophy*, Londres, 1799, p. xi et 57.,

⁶¹ Témoignage rapporté par Ampère dans les *Annales des mines*, t. v, 1820, p. 537.

les récits sur l'aimantation de couverts métalliques après Le passage de la foudre dans une pièce avaient vivement frappé les imaginations.

De nombreux essais avaient été tentés au cours du 18^e siècle pour reproduire cette action et aimanter des aiguilles de fer au laboratoire avec des décharges électriques produites par la machine à frottement. Ainsi Franklin écrit-il en 1751 : « Par le moyen de l'électricité, nous avons souvent (ici à Philadelphie) donné aux aiguilles la direction du pôle, et nous en avons changé les pôles à notre, gré » ⁶².

Mais on s'aperçoit peu à peu au cours de ces expériences où le fluide électrique pénètre l'aiguille par une de ses extrémités pour ressortir par l'autre, de l'importance fondamentale de l'orientation de l'aiguille par rapport au méridien magnétique terrestre pendant la décharge.

En effet, une aiguille orientée N-S s'aimante facilement et c'est toujours l'extrémité dirigée vers le Nord qui devient pôle nord, quel que soit le sens de la décharge. Lorsque l'aiguille est orientée E-O, elle ne s'aimante pas, ou alors elle acquiert, selon Beccaria, « une polarité très singulière », la moitié longitudinale de l'aiguille orientée vers le nord devenant magnétiquement nord et l'autre moitié sud ⁶³.

Le sens de la polarité magnétique acquise par l'aiguille ne dépendait donc pas tant, comme l'avait d'abord cru Franklin du sens de la décharge, que de la position de l'aiguille par rapport aux pôles de la terre.

On en vint donc naturellement à comparer ces aimantations par l'électricité à celles qu'on peut observer sur des pièces métalliques alternativement chauffées et refroidies ou bien martelées tout en restant orientées Nord-Sud. Ainsi pour Van Swinden qui, en 1784 dans son *Recueil de mémoires sur l'analogie de l'électricité et du magnétisme*, reprend les expériences de Franklin, Wilcke, Dalibard et Beccaria, le fluide électrique agit « comme un coup foudroyant », il agite les particules et « les frappe ». C'est cette hypothèse d'un effet mécanique de la décharge que reprend Biot en 1819. Franklin, à la fin de ses recherches sur ce sujet, pensait plutôt à une action calorifique : « quant au magnétisme produit par l'électricité, mon opinion actuelle est que ces deux puissances n'ont aucun rapport l'une à l'autre, et que la production apparente du magnétisme n'est qu'accidentelle (...). Un choc électrique traversant une aiguille dans une position (Nord-Sud), en la dilatant pour un moment, en fait (...) un aimant durable, non pas en lui donnant du magnétisme, mais en donnant occasion à son propre fluide magnétique de s'y mettre en mouvement » ⁶⁴. Mais dans une hypothèse comme dans l'autre, la cause finale est le magnétisme terrestre auquel l'électricité donne possibilité d'agir par son effet mécanique ou thermique lors de la décharge.

On peut souligner que cette explication négligeait cependant un phénomène bien connu : la faculté qu'a la foudre d'inverser les pôles d'une boussole orientée naturellement Nord-Sud. En effet, si le magnétisme terrestre était seul à agir, la foudre pourrait renforcer le magnétisme de l'aiguille, mais non l'inverser. Cette action ne peut s'expliquer que par l'effet magnétique de l'électricité.

Il en est de même pour l'expérience de Van Marum, rappelée par C.J. Lehot en 1821 : « Nous avons fixé, dit Van Marum, dans l'équateur magnétique une aiguille faite d'un ressort de montre, et nous avons fait passer la décharge par la largeur de cette aiguille, afin que la matière électrique put passer d'une extrémité à l'autre (...) et nous avons trouvé à notre grand étonnement, que cette

⁶² *Œuvres de M. Franklin*, traduites de l'anglais par M. Barbeau-Dubourg, 1773, t. I, p. 84, lettre à Collinson du 29 juin 1751. Voir aussi les textes choisis par P.G. HAMAMDJIAN, dans *Introduction à l'histoire des sciences*, 1971, t. II, p. 83-90.

⁶³ Cité par J.H. VAN SWINDEN, dans *Recueil de mémoires sur l'analogie de l'électricité et du magnétisme*, La Haye, 1784, t.I, p.499-501.

⁶⁴ *Œuvres de M. Franklin*, Paris 1773, t. I, p. 277-279, lettre son traducteur du 10 mars 1773.

lame de ressort avait acquis à ses deux extrémités une *beaucoup plus grande force* que de pareilles lames n'en avaient acquis lors des expériences précédentes » où les décharges les traversaient dans le sens de la longueur ⁶⁵.

Mais la foudre étant hors des moyens d'analyse et les expériences de décharges incertaines et variant beaucoup avec les conditions expérimentales, ces phénomènes furent mis de côté et considérés comme provisoirement résolus par l'affirmation d'absence de lien entre électricité et magnétisme de Franklin et Van Swiden.

2. Les théories unitaires

Cette conclusion négative des expérimentateurs du 18^e siècle, renforcée par le triomphe des conceptions newtoniennes de Coulomb, Laplace et Poisson n'exerça pas la même influence dans toute l'Europe. On sait qu'en effet au début du 19^e siècle une partie des pays germaniques est plus influencée par la philosophie romantique de la nature que par la philosophie newtonienne. Ainsi le Prussien A. von Humboldt, qui a travaillé avec de nombreux savants français entre 1804 et 1827, et tente de diffuser en Allemagne leur conception des sciences, est peu apprécié des Romantiques de son pays comme Goethe ou Schiller.

La déclaration de ce dernier à son propos est révélatrice : « Je déteste sa prétention de soumettre au compas l'insondable et mystérieuse nature, et de l'emprisonner ainsi dans des formules qui ne sont souvent que des mots » ⁶⁶. Humboldt était celui « qui pesait, mesurait, disséquait sans cesse » et donc appauvissait la nature ⁶⁷.

Certes ces jugements sont le fait de poètes. Mais la « Naturphilosophie » ayant influencé un certain nombre de savants allemands et des hommes comme Ørsted et Faraday, rappelons rapidement ses principales caractéristiques ⁶⁸.

Après la critique par Kant des cadres de la physique newtonienne, l'espace et le temps absolus, Schelling prône le refus des entités hypothétiques, « atomes » de matière ou « molécules » de fluides impondérables dans l'explication des phénomènes physiques. On ne peut transposer au monde microscopique des propriétés manifestées par le réel à l'échelle humaine. Dans toutes les manifestations de la vie et de l'esprit il perçoit une dualité, ou une polarité, dont l'équivalent au niveau le plus élémentaire de la matière est fourni par deux forces fondamentales : une force de répulsion (pour expliquer l'impénétrabilité) et une force d'attraction (pour expliquer la cohésion). L'espace vide de Laplace se trouve ainsi rempli par l'action de forces antagonistes.

Ces deux forces fondamentales se manifestent différemment suivant les conditions expérimentales : lumière, chaleur, électricité, magnétisme, affinités chimiques ... et elles peuvent se convertir d'une forme dans l'autre. Il suffit pour cela de savoir contrôler la modification des conditions expérimentales qui permet cette conversion. L'unité profonde de la Nature est ainsi affirmée par-delà la diversité des phénomènes visibles. La philosophie romantique idéaliste de la Nature a eu une influence certaine sur le chimiste hongrois J. Winterl, les physiciens allemands J. Ritter et P. Erman, l'autri-

⁶⁵ C.J. LEHOT, *Observations sur le galvanisme et le magnétisme*, 1821, qui cite VAN MARUM, *Description d'une très grande machine électrique*, 1787, t. I, p. 176. !

⁶⁶ P. CHARLES, *Meurs et littérature du XIX siècle en Allemagne*, 1861, cité p. 193.

⁶⁷ *Ibid.*, p. 192.

⁶⁸ Pour l'influence de la Naturphilosophie sur Ørsted, voir R.C. STAUFFER « Speculation and experiment in the background of Ørsted discovery » dans *Isis*, 1957, p. 33-50. Pour l'influence sur Faraday : L.P. WILLIAMS, *The origins of field theory*, 1965, chap. II; L.P. WILLIAMS, *Michael Faraday*, 1965, p. 60-73; T.S. KUHN, « Energy conservation as an example of simultaneous discovery » dans *Critical problems in the history of science*, ed. by M. Clagett, 1959.

chien J. Prechtel, et enfin sur le danois H.C. Ørsted. Le problème de cette influence sur Faraday est encore ouvert.

L'électricité et le magnétisme, dans cette optique, ne sont que deux manifestations différentes des mêmes forces fondamentales. Il faut étudier toutes les analogies entre les deux phénomènes pour mettre en évidence leur unité. Or la découverte de la pile fournit une nouvelle source d'électricité et ouvre donc une nouvelle possibilité de recherche : la mise en parallèle du voltaïsme et du magnétisme.

C'est à cette tâche que se consacre en 1803 J. Ritter, physicien allemand qui bénéficiait alors d'une réputation scientifique pour sa découverte de l'électrolyse de l'eau (indépendamment de Nicholson et Carlisle) en 1799 et celle de l'action chimique des rayons du spectre lumineux situés au-delà du violet ⁶⁹. Ces deux découvertes d'actions de fluides impondérables, l'électricité et la lumière, sur la matière l'ont conforté dans son attirance pour la Naturphilosophie.

Lorsqu'il recherche les analogies entre le voltaïsme et le magnétisme, il souligne d'abord que la pile retient les fluides électriques à ses deux extrémités comme l'aimant retient les fluides magnétiques à ses pôles (d'où la dénomination des « pôles » de la pile).

Après avoir découvert le principe de l'accumulateur, qu'il appelle « pile secondaire », il compare cette pile secondaire à un aimant. Son désir de parfaire le parallélisme entre électricité et magnétisme l'incline à voir que lorsqu'elle est isolée et non chargée, « couchée horizontalement, la pile (secondaire) reçoit un peu d'électricité positive vers le Nord et un peu de négative vers le Sud (...). Ainsi on doit penser que la terre a des pôles électriques comme elle a des pôles magnétiques, et il faut ajouter un méridien électrique au méridien magnétique » ⁷⁰.

Ørsted rapportant les expériences de Ritter annonce même que celui-ci « a chargé des fils métalliques par une pile, ce qui leur a donné la propriété de se tourner vers les pôles électriques » de la terre, soit dans la direction NNE-SSO. Il remarque cependant que lui-même n'a pas réussi l'expérience !

Ayant ainsi montré que la pile peut se comporter comme un aimant, Ritter entreprend « une suite d'expériences qui font voir le fer aimanté dans toutes ses relations avec l'électricité ». C'est ainsi qu'une cuisse de grenouille placée entre un fil aimanté et un non-aimanté subit une « palpitation galvanique », qui est d'ailleurs plus forte si le pôle est Sud que s'il est Nord. Cette différence entre les pôles d'un aimant prouve donc qu'ils ont des affinités chimiques opposées comme les pôles de la pile et une « batterie d'aimants » (série d'aimants dont les pôles opposés sont séparés par de l'eau) devrait réaliser l'électrolyse de l'eau ! ⁷⁰. L'aimant peut donc produire les mêmes phénomènes que le voltaïsme. Électricité et magnétisme sont ainsi unifiés grâce à la notion de polarité, essentielle dans sa philosophie des sciences.

Ces expériences transmises à Paris par Ørsted furent tentées par Hachette et Desormes en 1805, qui en particulier placèrent une pile (en circuit ouvert) flottant à la surface de l'eau pour qu'elle s'oriente suivant le méridien magnétique. Mais ces expériences furent des échecs et de ce moment date le mépris des physiciens français pour les théories tendant à relier voltaïsme et magnétisme. Malgré ses premières découvertes, Ritter fut définitivement désavoué en France.

⁶⁹ J. RITTER, « Expérience sur la lumière, communiquées par J.C. Ørsted », dans *Journal de Physique*, t. 57, 1803, p. 409.

⁷⁰ *Journal de Physique*, t. 57, 1804, p. 363. Les premiers résultats de Ritter sur la pile secondaire furent transmis par H.C. Ørsted, avec qui il était en correspondance, à l'Institut et à la Société Philomatique. L'effet fut si favorable que Biot pria Ørsted d'encourager son ami dans ses recherches de sorte qu'il puisse concourir pour le prix de 60 000 F instauré par Napoléon pour récompenser une très grande découverte en électricité (et qui ne fut jamais décerné...). C'est peut-être l'espoir de cette fortune, qui fit aussi rêver Ampère lorsqu'il était jeune professeur en attente de poste, qui poussa Ritter à annoncer des résultats étonnants mais hasardeux. Sa gêne matérielle à cette époque était telle qu'Ørsted l'aida financièrement.

⁷¹ *Journal de Physique*, t. 57, 1804, p. 401-405. et 406-409.

Si, à partir de cette époque, Ørsted prend lui aussi ses distances par rapport à Ritter, il reste cependant en contact épistolaire avec lui et surtout il conserve en lui ce grand rêve d'unité. Ainsi en 1805 il écrit : « What else are the chemical forces but the opposite electricities ? (...) The same forces manifest themselves in magnetism as in electricity ... All forces in Nature may be reduced to these two » ⁷².

Les deux forces fondamentales de Schelling sont donc particularisées : ce sont les forces électriques qui sont à la base de tous les phénomènes physiques.

Dans son ouvrage de 1813, *Recherches sur l'identité des forces chimiques et électriques* ⁷³, Ørsted reprend et développe cette affirmation, son but étant beaucoup plus général que ne l'indique le titre puisque toutes les forces de la nature, y compris la nature vivante, sont censées avoir pour origine les forces électriques.

Le cas particulier des liens électricité-magnétisme-voltaïsme est assez complexe chez Ørsted : on a souvent dit qu'il avait pressenti dès 1813 la possibilité d'action du courant électrique sur l'aimant, mais il faut replacer cette affirmation dans l'ensemble de sa théorie. Pour cela nous utiliserons deux textes : le chapitre VIII « Du magnétisme » de l'ouvrage de 1813, et la traduction du texte allemand correspondant au même chapitre dans la première rédaction de l'ouvrage de 1812 ⁷⁴.

Au départ, « la grande ressemblance entre les attractions électriques et magnétiques et la similitude de leurs lois » ⁷⁵, amène naturellement à rapprocher ces phénomènes, cependant « le fait que les corps électrisés et ceux magnétisés n'exercent point, du fait de leur état, une attraction ou une répulsion, constitue une grosse difficulté » ⁷⁶.

Cette absence d'interaction est-elle la preuve que le magnétisme ne peut avoir une origine électrique ? Ørsted la rapproche de celle qu'on peut observer entre l'électricité (statique) et le galvanisme. En effet, on peut faire varier la charge absolue d'une pile à l'aide d'un condensateur, mais cela ne modifie pas son fonctionnement en tant qu'appareil électromoteur (c'est-à-dire sa force électromotrice). Les actions chimiques de la pile restent identiques : « C'est son état électrique comme corps entier plutôt que comme une chaîne active » qui est transformé.

De même une baguette de verre frotté approchée d'une barre aimantée agit sur elle comme elle agirait sur une barre identique non aimantée ; ainsi, écrit Ørsted, « ce n'est pas la répartition intérieure (de l'électricité) créatrice du magnétisme qui est transformée » ⁷⁷. L'électricité ordinaire n'a donc pas d'action plus spécifique sur une pile que sur un aimant ou sur tout autre corps. La pile devant ses propriétés à des forces électriques, il peut donc en être de même pour l'aimant.

En outre Ørsted établit une *hiérarchie*, qu'il reprend d'ailleurs à Ritter, entre les différentes formes d'action de l'électricité : « la force d'activité galvanique tient le milieu entre la force magnétique et la force électrique » ⁷⁸.

Il n'explique pas l'origine de ce classement entre les formes d'activité de l'électricité : électricité de frottement - électricité galvanique - magnétisme. Il peut cependant s'expliquer par la hiérarchie

⁷² *Naturvidenskabelige Skrifter-Scientific Papers*, H.C. Ørsted, Copenhague, 1920, ed. by K. Meyer, p. XLV.

⁷³ H.C. ØRSTED, *Recherches sur l'identité des forces chimiques et électriques*, Paris, 1813, traduction de M. de Serres.

Cet ouvrage est une traduction remaniée de l'ouvrage allemand *Ansichten der chemischen Naturgesetze*, paru à Berlin en 1812.

⁷⁴ La traduction française du chapitre « Bemerkungen ueber den Magnetismus » de l'ouvrage précédent, reproduit dans les *Scientific Papers*, t. II, p. 146-149, a été réalisée par P.G. Hamamdjian, dans *Ørsted et la naissance de l'électromagnétisme*, thèse de 3^e cycle, Sorbonne, exemplaire dactylographié, 1966, p. 84-86.

⁷⁵ *Recherches sur l'identité des forces chimiques et électriques*, 1813, p. 234.

⁷⁶ *Ørsted et la naissance de l'électromagnétisme*, 1966, p. 84.

⁷⁷ *Ibid.*, p. 85.

⁷⁸ *Recherches...*, p. 236 (voir aussi p. 138 pour la « distance » entre l'électricité due au frottement et celle due au contact).

entre les forces mises en jeu pour les faire apparaître : frottement pour la première, contact pour la deuxième, et enfin action à distance pour le magnétisme. La violence relative des phénomènes entraînés va également dans le même sens.

Dans cette interprétation, nous comprenons mieux le reste de l'original allemand (quelque peu obscur comme le reconnaîtra lui-même Ørsted en 1821)⁷⁹.

« Il semble donc que les forces d'effet différent se croisent et se rencontrent sans se gêner mutuellement. La forme d'action de la chaîne galvanique se situant au milieu entre la forme purement électrique et la magnétique, les forces -dans la chaîne galvanique sont beaucoup plus latentes que dans la première et beaucoup moins que dans la dernière. Il n'est par conséquent pas improbable que les forces électriques peuvent croiser les forces magnétiques sans les déranger »⁸⁰,

Il est donc inutile de chercher à faire agir l'électricité (statique) sur l'aimant car la différence entre ces deux formes d'activité de l'électricité est trop grande. Le seul espoir est de faire agir l'électricité galvanique, et encore faut-il qu'elle soit dans son état « le plus latent » pour que les deux formes d'électricité ne se croisent pas sans agir. Puisque ce sont les formes identiques qui interagissent, il faut minimiser la différence entre deux formes différentes pour espérer les voir agir l'une sur l'autre.

La conclusion laconique du chapitre VIII : « *Il faudrait essayer si l'électricité dans son état le plus latent n'a aucune action sur l'aimant, comme tel* »⁸¹, montre donc le désir de chercher un lien entre les deux dernières formes de l'électricité. Mais Ørsted ne reprit l'étude de ce sujet qu'au printemps 1820.

Si les théories unitaires de Ritter et d'Ørsted sont d'une certaine importance, c'est par le double rôle qu'elles ont joué : d'une part comme source de la découverte de l'électromagnétisme par Ørsted, et d'autre part comme cause du refus des physiciens français de considérer avec sérieux les expériences prouvant les liens entre les différentes branches de la physique, issues de la Naturphilosophie. L'expérience d'Ørsted de 1820 elle-même provoqua d'abord surtout la suspicion et l'incrédulité.

Mais il ne faut pas s'exagérer l'influence de ces théories même sur les physiciens allemands. Ainsi J.C. Schweigger qui fonda et dirigea de 1811 à 1828 le *Journal für Chemie und Physik*, professeur à l'Université de Halle, donne la préférence aux articles ayant une base expérimentale face aux articles spéculatifs ; L.W. Gilbert, éditeur des *Annalen der Physik und Chemie* de 1799 à 1824, témoigne une grande méfiance vis-à-vis des « Naturphilosophen », c'est lui d'ailleurs qui affirma le premier que la découverte d'Ørsted était due au hasard et non, comme celui-ci l'a toujours affirmé, à ses réflexions théoriques⁸²

En conclusion, nous voyons se dégager dans les années 1810-1820 deux courants principaux de recherches : d'une part des recherches théoriques et mathématiques sur l'électrostatique et la

79 « Considérations sur l'électromagnétisme » dans *Journal de Physique*, t. 93, 1821, p. 161-163 : « [Ma théorie de 1813] a paru peu vraisemblable à la plupart des physiciens. Peut-être faut-il attribuer ce sentiment en partie à l'obscurité de l'objet, en partie à la manière imparfaite dont j'ai exposé ma théorie ; car il faut avouer que de nouvelles idées se présentent rarement avec toute leur clarté, même à leur auteur ».

80 Ørsted et la naissance de l'électromagnétisme, 1966, p. 85.

81 *Recherches...*, p. 238.

82 L. GILBERT, *Annalen der Physik*, t. 66, 1820, p. 291.

L'ARRIÈRE-PLAN CONCEPTUEL ET EXPÉRIMENTAL

magnétostatique, et d'autre part des recherches expérimentales sur les causes et effets, essentiellement chimiques, du voltaïsme.

Ces deux courants, bien que bouleversés par la découverte de l'électromagnétisme, surtout pour le deuxième, vont se poursuivre indépendamment pendant toute la première moitié du 19^e siècle : le premier avec Poisson, Gauss et Green ... , le deuxième avec les électrochimistes : Davy, Faraday, de La Rive ... et avec les théoriciens de la conductibilité électrique : Biot, Pouillet, Fechner, Ohm...

Les physiciens de ces deux courants, situés dans des cadres conceptuels et même expérimentaux ⁸³ différents, vont accueillir et étudier l'expérience d'Ørsted de manière toute différente.

⁸³ Par exemple, pour J.B. Biot, la balance de torsion de Coulomb est un instrument « sublime et indispensable dans cette branche de la physique », alors que cet appareil est quasiment inutilisé à l'étranger.

L'ÉLECTROMAGNÉTISME : DÉCOUVERTE ET PREMIÈRES RECHERCHES

I. VIE SCIENTIFIQUE ET FORMATION INTELLECTUELLE DES PHYSIENS DANS LES PRINCIPAUX PAYS EUROPÉEN

1. Diffusion et organisation de la recherche

Sans vouloir faire un tableau exhaustif de la vie scientifique européenne du début du XIX^e siècle, soulignons quelques-uns de ses caractères parmi ceux qui ont eu une influence sur le déroulement des recherches en électromagnétisme et qui la distinguent considérablement de la vie scientifique contemporaine.

Le premier de ces caractères est l'importance des particularismes nationaux. Il n'existe pas encore de communauté scientifique internationale malgré l'importance et la qualité des liens privés entre savants de divers pays.

Ces particularismes sont rarement dus à l'intervention des pouvoirs publics. Seul Napoléon a voulu donner des orientations précises à la recherche; en particulier, dans le domaine qui nous concerne, il avait annoncé en 1801, après avoir assisté aux expériences de Volta lui-même, la création d'un prix de 60 000 F pour une découverte en électricité aussi importante que celle de la pile. Ce prix ne fut jamais décerné mais fit rêver des hommes comme Ørsted et Ampère ...

En Grande-Bretagne, les savants dépendent souvent d'institutions privées comme la Royal Institution tandis qu'en Allemagne, l'absence d'unité politique renforce l'isolement des physiciens dans les différentes universités et valorise l'image de l'homme seul face à la Nature à déchiffrer.

Les différences de statut, pour le physicien comme pour sa discipline, de liens avec les applications industrielles, avec les autres milieux intellectuels ... contribuent à créer ce qu'en 1833 le physicien suisse A. de La Rive appelait « l'esprit anglais » ou « le caractère germanique » :

« En Italie tout est invention ; aussi est-ce au génie producteur et à l'imagination des savants italiens que nous devons les premières expériences de Galvani et la pile de Volta (...).

« Transportée en Angleterre, cette pile devint par l'effet de ces vues d'application qui sont éminemment propres à l'esprit anglais, une source de découvertes importantes (...).

« Passons en France ; on retrouve dans les travaux sur l'électricité des Coulomb, des Poisson, des Ampère et de tant d'autres, ces qualités qui ont toujours caractérisé l'étude des sciences en France, cet esprit d'analyse et de généralisation si remarquables, ce talent de suivre (...) un principe dans toutes ses conséquences (...).

« Enfin le génie des rapports, cette tendance un peu mystique à saisir entre les phénomènes divers des analogies plus ou moins fondées, qui est le propre du caractère germanique, se fait bien vite apercevoir dans le pas que les Allemands ont fait faire à l'électricité »¹.

Les correspondances personnelles ainsi que les voyages privés ouvrent les scientifiques aux productions des autres pays. Ainsi, les pays germaniques et nordiques envoient-ils leurs étudiants se former dans un tour des capitales européennes, Paris étant le centre du voyage. Mais les problèmes de compréhension n'en sont pas toujours résolus pour autant, le latin ayant perdu son rôle de langue internationale et l'anglais ne l'ayant pas encore acquis. Un exemple révélateur : Ampère ayant été nommé avec Dulong par l'Académie des sciences pour faire un rapport sur le mémoire fondamental de Ohm en 1827, il n'y eut aucun rapport et le mémoire n'eut aucune influence immédiate, n'ayant pas été traduit ² !

Les journaux scientifiques jouent le rôle prépondérant dans la transmission des nouvelles recherches : peu de travaux originaux sont publiés dans des Traités ou des ouvrages d'enseignement, comme c'est encore courant au 18^e siècle ³. Mais ces journaux ne jouant pas encore le rôle de dépositaire systématique des découvertes, certaines d'entre elles sont parfois communiquées par des lettres privées ou des communications orales ce qui entraîne des controverses de priorité d'autant plus nombreuses que la période sur laquelle ces découvertes s'échelonnent est plus courte.

Les principaux défauts de ces journaux sont les retards de publication et l'absence de traductions intégrales des mémoires étrangers : ces derniers sont en général résumés et commentés par l'éditeur de la revue. C'est ainsi que les Allemands ne connaissent l'œuvre d'Ampère qu'à travers le texte de Gilbert dans ses *Annalen der Physik*. Réciproquement, les Français ne connaissent les recherches des physiciens allemands que par les lettres que ceux-ci envoient à Ampère ou à partir de 1822 par les brèves notices du *Bulletin* de Férussac ⁴. Les transcriptions effectuées par des non-spécialistes du domaine considéré augmentent souvent les difficultés de compréhension des mémoires.

Si les journaux sont parfois eux-mêmes à l'origine de réunions de physiciens, comme dans le salon de lecture du baron de Férussac à Paris ou dans la bibliothèque de G. de La Rive à Genève, ce sont les sociétés et institutions scientifiques qui en sont les principales instigatrices. En Grande-Bretagne, la Royal Institution permet à ses enseignants de mener un travail de recherche dans ses laboratoires, ce dont profitèrent H. Davy, puis M. Faraday, tandis que la Royal Society souffre d'une pléthore d'amateurs plus fortunés que producteurs de mémoires scientifiques. Ainsi vers 1830 C. Babbage et Herrschell envient l'Académie des sciences de Paris pour le nombre restreint et la qualité scientifique éprouvée de ses membres ⁵.

Cette Académie des sciences est autour des années 1815-1825 le lieu d'un changement d'orientation dans le domaine des sciences physiques : changement théorique et changement de pouvoir. Jusque vers 1815 Laplace et ses émules dominent la vie scientifique : les principaux programmes de recherches sont élaborés au sein de la Société d'Arcueil. C'est le triomphe de la physique newtonienne avec les œuvres de Laplace lui-même, Coulomb, Biot, Poisson, Malus... qui tentent d'expliquer tous les phénomènes physiques par des forces à distance entre particules de matière ou de fluides impondérables.

1 A. DE LA RIVE, « Esquisse historique des principales découvertes faites dans l'électricité depuis quelques années », dans *Bibliothèque Universelle*, 1833, t. 52, p. 227.

2 *Procès-Verbaux des séances de l'Académie des sciences*, Hendaye, 1918, t. VIII, séance du 4 juin 1827, p. 545.

3 Comme exception, on peut citer le mémoire de Biot et Savart lu à l'Académie des sciences les 30 octobre et 18 décembre 1820 et dont les résultats ne furent publiés que dans la 3^e édition du *Précis élémentaire de physique* de Biot en 1824.

4 *Bulletin général et universel des annonces et des nouvelles scientifiques*.

5 C. BADAGE, *Reflections on the decline of science in England*, 1830. La Royal Society comprenait 685 membres, contre 40 pour l'Académie des sciences de Paris.

Le tournant est marqué par le succès de la théorie ondulatoire de Fresnel, en particulier lors du prix de L'Académie sur la diffraction qu'il remporte en 1817 malgré les oppositions que sa théorie a suscitées de la part des tenants de la théorie corpusculaire de la lumière. Les fluides impondérables, lumineux, calorique, électrique et magnétique soulèvent de plus en plus d'objections de la part des jeunes physiciens. Nous verrons la théorie d'Ampère, soutenue par Arago, susciter les mêmes oppositions au sein de l'Académie que celles rencontrées par Fresnel.

Le changement d'orientation théorique se traduit dans les faits lors de l'élection du secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences en 1822 : Fourier est élu face à Biot et ce dernier cède le terrain à ses opposants en se retirant plusieurs années à la campagne. Cependant, il ne se reforme pas de groupe homogène comme le précédent : la Société d'Arcueil disparue, aucune autre ne la remplace même si des cercles d'amitié et de discussion se reforment autour des salons d'Arago, de Fourier et de Cuvier. Arago lui-même perd peu à peu son rôle de soutien et d'animateur et délaisse le champ de la recherche théorique.

Si l'Académie des sciences est le centre de la vie scientifique française, ce sont les institutions d'enseignement qui fournissent un statut à la plupart des savants : Gay-Lussac, Biot, Poisson, Petit, Arago, Ampère... se rencontrent quotidiennement dans les couloirs soit du Collège de France, de l'Ecole Polytechnique ou de la nouvelle faculté des sciences. Ces charges d'enseignement sont parfois lourdes, surtout lorsqu'elles se cumulent comme ce fut le cas pour Ampère. Elles permettent cependant aux physiciens qui en sont responsables de travailler dans des laboratoires. Si la faculté des sciences n'ayant en 1820 qu'une dizaine d'années d'existence ne possédait guère que quelques instruments de démonstration ⁶, par contre le Collège de France et l'Ecole Polytechnique disposaient de laboratoires relativement bien équipés, même si c'est encore l'Ecole de Médecine qui semble avoir disposé des meilleures piles de Paris.

Cependant, de nombreuses expériences sont encore menées de façon privée : ainsi Ampère achète de ses deniers (qu'il ne savait compter !) une puissante pile électrique destinée à la faculté des sciences pour réaliser chez lui ses expériences sur les courants. Il est vrai qu'il fit, comme d'autres savants, des demandes de crédits spéciaux à l'Académie des sciences.

2. Formation intellectuelle des principaux intervenants

Pour Ørsted, le progrès des sciences se fait par un mouvement oscillant entre deux tendances contraires : une partie des savants est sensible à l'unité des phénomènes naturels et aux analogies qu'ils présentent tandis que les autres s'attachent à l'exactitude dans toutes les parties de leurs théories ou de leurs expériences ⁷. En fait, ce balancement est perceptible dans l'œuvre de la plupart des grands physiciens et tout particulièrement, comme nous allons le voir, dans celle d'Ørsted lui-même.

H.C. Ørsted (1777-1851)

Après une éducation quelque peu désordonnée, et après avoir aidé son père dans la pharmacie où celui-ci travaillait, le jeune H.C. Ørsted (qu'il écrivait lui-même Ørsted), entreprend des études de philosophie à Copenhague en 1794 ⁸. Mais c'est un diplôme de pharmacie qu'il obtient trois ans

⁶ A la Restauration, les cours de la faculté bénéficient d'un grand succès : J.B. Boussingault rapporte qu'« on se battait pour entrer dans les amphithéâtres où professaient Guy-Lussac, Thénard, Biot, Villemain, Guizot » (*Mémoires*, t. I, 1892, p. 73).

⁷ H.C. ØRSTED, article « Thermo-electricity », dans *Edinburgh Encyclopaedia*, ed. by D. BREWSTER, 1830, t. 18, p. 573.

⁸ Voir l'étude sur la vie et l'œuvre d'Ørsted de K. MEYER dans H.C. Ørsted, *Naturvidenskabelige skrifter - Scientific Papers*, Copenhague 1920, t. I, p. XI-CLXVI.

plus tard ! La philosophie et l'étude des sciences qu'il découvre simultanément à cette époque seront toute sa vie entremêlées dans ses activités intellectuelles. En 1799 il soutient une thèse de doctorat sur les *Fondements métaphysiques de la connaissance scientifique* de Kant et participe à la rédaction d'une revue destinée à la défense des thèses kantienne. Mais dès qu'il apprend la découverte de la pile électrique par Volta en 1800, il étudie les décompositions chimiques qu'elle permet et invente même un dispositif destiné à mesurer l'effet du courant par le volume gazeux dégagé lors d'une électrolyse.

A vingt-quatre ans il entreprend son voyage à travers l'Europe : rencontre enthousiaste avec Ritter à Iéna; à Berlin, il suit les cours de Fichte, se lie d'amitié avec F. Schlegel et discute avec passion les thèses de Schelling.

Après avoir réalisé de nombreuses expériences sur le galvanisme avec Ritter, il part pour Paris où il expose des découvertes de ce dernier, en particulier celle du principe des accumulateurs. Mais, comme nous avons vu, les mémoires ultérieurs que Ritter fait parvenir à Ørsted à Paris sur les pôles électriques de la terre ou la décomposition de l'eau par un aimant jettent le discrédit sur les théories unitaires. Ce discrédit rejaillit en partie sur Ørsted lui-même et jusque dans son pays, l'étiquette de Naturphilosopher lui nuit : il n'obtient pas à son retour, contrairement à l'usage, de poste d'enseignant.

Même si peu à peu Ørsted se détourne des théories de Winterl et Ritter, son détachement vis-à-vis de la philosophie newtonienne est tel qu'en 1808 il envisage, dans une lettre à Ritter, d'expliquer ses expériences d'électrostatique par la loi de Simon selon laquelle « the effect of electricity decreases as the inverse distance, not as the inverse square of the distance »⁹.

Lors de son deuxième voyage à Paris, en 1813, il reprend et fait traduire sous le titre *Recherches sur l'identité des forces chimiques et électriques* un ouvrage paru l'année précédente à Berlin. Bien que dédié à Berthollet qui dut approuver le désir exprimé par Ørsted de voir approcher le jour où « toute cette science (la chimie) sera convertie en une théorie des forces à laquelle les mathématiques s'appliqueront »¹⁰, et défendu par le traducteur de l'accusation de contenir « de trop subtiles spéculations »¹¹, le livre d'Ørsted illustre bien l'influence philosophique qu'il a subie.

Cependant au cours de ses recherches, en particulier en acoustique, et de son enseignement il a évolué vers une plus grande sensibilité à la rigueur. Berzelius lui-même qui au début du siècle s'était opposé aux thèses du jeune Ørsted écrit en 1819 à un ami : « il y a quinze ans on aurait pu appeler Ørsted un exalté, mais à présent nullement »¹². Son ouvrage de 1813 est d'ailleurs reçu favorablement en particulier par Chevreul en France et par T. Thomson en Angleterre même s'il persiste toujours un fossé entre la conception globale et quasi religieuse de la science d'Ørsted et celle d'hommes comme Laplace ou Biot. Ce fossé demeure, même après que la reconnaissance officielle fut venue avec la découverte de l'électromagnétisme, témoin cette lettre qu'Ørsted écrit de Paris en 1823 : « On many occasions I have perceived that it is almost impossible to make my theory intelligible to Frenchmen without at the same time explaining to them some features of the Natural Philosophy »¹³.

II. Davy (1778-1829) et M. Faraday (1791-1867).

Ayant rédigé et relié une série de cours de Davy auxquels il avait assisté, c'est par la qualité de son travail manuel autant que par son vif désir d'apprendre la chimie que le jeune apprenti-relieur

⁹ *Ibid.*, t. I, p. XLIII.

¹⁰ H.C. ØRSTED, *Recherches sur l'identité des forces chimiques et électriques*, 1813, p. 4.

¹¹ *Ibid.*, p. XVIII.

¹² *Correspondance d'Ørsted avec divers savants*, publiée par M.C. HARDING, Copenhague, 1920, t. II, p. 292.

¹⁴ K. MEYER, p. LIV.

Michael Faraday réussit à convaincre le respectable professeur de chimie de la Royal Institution, sir Humphry Davy, de l'embaucher comme assistant de laboratoire en 1813.

D'origine très modeste, Faraday avait pour toute formation scientifique la lecture des ouvrages de vulgarisation qui passaient entre ses mains. Après avoir vu défiler le meilleur et le pire, il suit les injonctions de l'ouvrage qu'il a pris comme guide de sa formation intellectuelle, *The improvement of the mind*, et décide de juger de la vérité des théories par les faits seuls. Paradoxalement, l'écrit avait peu d'autorité morale sur lui ¹⁴.

Sa passion de découvrir la vérité du monde matériel qui s'insère dans une vision religieuse de l'univers lui permet de surmonter les lacunes de sa formation, en particulier dans le domaine des mathématiques. Il sut si bien se rendre indispensable à Davy que, lorsqu'en octobre 1813 celui-ci décide d'un voyage à travers l'Europe, pourtant déchirée par les guerres napoléoniennes, c'est Faraday qu'il choisit comme assistant. A Paris, ils voient tous les physiciens et chimistes, Gay-Lussac, Chevreul, Arago, Thénard, Ampère... et se trouvent plongés au cœur des principaux problèmes scientifiques de l'heure : structure du chlore, découverte de l'iode, théories de l'électrolyse...

De passage à Genève, ils font étape chez G. de La Rive qui noue amitié avec le jeune Faraday. A Florence, Davy réussit à faire brûler un diamant dans l'oxygène, montrant ainsi qu'il est constitué de carbone, et enfin à Milan, ce sont les discussions avec Volta.

Après cette confrontation avec les questions les plus controversées de l'époque, Faraday reprend à Londres sa formation chimique sous la direction de Davy. Ce dernier, influencé sans doute par son ami Coleridge qui propagea la Naturphilosophie allemande en Angleterre, a toujours professé des doutes sur la réalité des fluides impondérables d'une part et sur celle des atomes de matière d'autre part.

Ses convictions ont été renforcées par la découverte, dans les premières années du siècle, des interactions entre les supposés fluides lumineux, calorique et électrique avec la matière : action des rayons infra-rouges et ultra-violets sur les corps, et décomposition de la matière par l'électricité dans l'électrolyse.

La critique du modèle des atomes en boule de billard avait rendu Davy favorable à la théorie atomique établie par Boscovich en 1758 dans sa *Philosophiae Naturalis Theoria*. Mais ce n'est qu'au retour de son voyage européen qu'il suit publiquement cette théorie : un atome se réduit à un centre de force, sans masse ni dimension, qui crée autour de lui une force d'abord répulsive (pour expliquer l'impénétrabilité) puis plusieurs fois alternativement attractive et répulsive, et enfin à une certaine distance du centre, la force s'identifie à la force d'attraction universelle en $1/d^2$. Un élément chimique étant constitué de plusieurs atomes ponctuels associés, il possède des zones d'attraction et de répulsion plus ou moins fortes suivant les directions.

En 1815 Davy écrit : « By assuming certain molecules endowed with poles in points of attraction and repulsion as Boscovich has done, and giving then gravitation and form, i.e. weight and measure, all the phenomena of chemistry may be accounted for » ¹⁵,

Faraday suit Davy dans sa critique de la théorie des fluides, et en particulier pour le magnétisme, il est dans l'expectative la plus totale : « It is difficult to form any satisfactory ideas respecting the nature of magnetism ; it may be a modification of gravitation, or the power producing it, in certain bodies. It may be a modification of electricity, or the cause which produces it. Or it may be dissimilar

¹⁴ Voir l'étude de L.P. WILLIAMS, *Michael Faraday, a biography*, 1965. La participation de Faraday, dès 1810, aux réunions d'un groupe de jeunes gens passionnés de sciences lui permit d'observer quelques appareils de physique et de chimie et de juger de l'importance de l'expérimentation.

¹⁵ Cité par L.P. WILLIAMS, p. 78.

from all others powers or forms of matter and perfectly distinct. And again it may be a peculiar kind of attraction or a peculiar and subtil fluid »¹⁶,

Peut-être a-t-il subi l'influence d'Ersted qui avait laissé à Paris, juste avant que Davy et Faraday n'y arrivent eux-mêmes en octobre 1813, son livre et le souvenir de ses discussions, en particulier avec Chevreul dont Faraday fréquenta également le laboratoire¹⁷.

Toujours est-il qu'il se distingua toute sa vie des physiciens français par ce scepticisme profond vis-à-vis des entités microscopiques, ses rêves d'unité entre les différentes branches de la physique et son peu d'attrance pour la mathématisation des théories physiques.

Gaspard de La Rive (1770-1834) et son fils Auguste de La Rive (1801-1873).

D'une ancienne famille genevoise G. de La Rive devait jouer toute sa vie un important rôle social, politique et scientifique dans sa cité. Professeur de chimie à la faculté à partir de 1802, il eut entre autres comme élève J.B. Dumas qui rapporte à son sujet qu'« ayant fait ses études en Angleterre, il en avait conservé le goût des grands appareils (...), son laboratoire était anglais et ses piles de Volta, par leur importance, n'avaient pas de rivales sur le continent, (mais ...) son enseignement était complètement français »¹⁸,

Ce témoignage de Dumas, étudiant à Genève de 1816 à 1823, situe bien l'originalité des physiciens suisses : le carrefour géographique est aussi un carrefour intellectuel.

M.A. Pictet qui enseignait la physique et fonda la principale revue scientifique et littéraire éditée à Genève, la *Bibliothèque britannique*, étudia pour sa part à Paris où il se lia d'amitié en particulier avec Biot et fut membre associé de la Société d'Arcueil¹⁹. Si, à la chute de l'Empire, sa revue devient la *Bibliothèque Universelle*, il faut y voir une volonté affirmée d'ouverture à toutes les formes de pensées.

G. de La Rive qui collabora à la rédaction de la revue représentait plutôt le lien avec les savants anglais. C'est au retour de son voyage à Londres de 1818 qu'il décida de faire construire pour son laboratoire une pile identique à celle qu'il avait vu dans celui de Davy. Il est alors le seul sur le continent à pouvoir reproduire l'étincelle entre deux pointes de charbons reliés aux pôles d'une pile, qu'on appelle aujourd'hui arc électrique. C'est d'ailleurs cette expérience qu'Arago, intéressé par les rapports entre l'électricité et la lumière, venait voir en septembre 1820 lorsque Pictet reçut le mémoire d'Ersted annonçant sa découverte de l'électromagnétisme.

Bénéficiant de liens étroits avec l'industrie horlogère de Genève, il fut un des rares à pouvoir faire reproduire rapidement les appareils délicats imaginés par Ampère pour montrer l'action entre courants mobiles.

Son fils Auguste, en contact dès son plus jeune âge, avec les savants de passage chez son père, se tourne naturellement vers les sciences et remplace Pictet à la chaire de physique en 1823. Alors que son père avait diffusé la théorie électrochimique de Berzélius, Auguste de La Rive s'y oppose et sera pendant toute la première moitié du 19^e siècle un des plus ardents défenseurs de la théorie chimique de la pile, rejoignant ainsi Faraday face aux tenants de la théorie du contact de Volta.

¹⁶ Manuscrit de Faraday de 1816, cité par L.P. WILLIAMS, p. 86.

¹⁷ Pendant son séjour à Paris, Ersted lisait la traduction de son livre au fur et à mesure à Chevreul dont le laboratoire n'était qu'à quelques pas de sa demeure, et ce dernier, partisan des théories d'Ersted, suivit sa classification chimique dans son *Dictionnaire des sciences naturelles* (1818). (*Correspondance d'Ersted*, 1920, t. II, p. 291-292).

¹⁸ J.B. DUMAS, *Discours et éloges académiques*, 1885, t. I

¹⁹ VOIR M. CROSLAND, *The Society of Arcueil*, 1967.

Etant lié d'amitié avec Faraday et Ampère, avec qui il mène une série d'expériences en août 1822, il fut à plusieurs reprises un lien entre les deux hommes.

De façon plus générale, les Genevois furent souvent un intermédiaire important entre des hommes et des écoles de pensée pour qui la langue était le premier obstacle à toute compréhension.

J.B. Biot (1774-1862).

Biot est issu de la première promotion de l'Ecole Polytechnique, comme Poinsot et Malus. Remarqué par Monge puis Laplace, il obtient la protection de ce dernier : dès 1800 il est nommé professeur de physique générale et mathématique au Collège de France et en 1809 à la faculté des sciences. Après des travaux de mathématiques et d'astronomie, il se tourne vers la physique : magnétisme terrestre, géodésie, électricité, acoustique et surtout optique²⁰.

Ardent défenseur des théories newtoniennes, qu'en bon disciple de Laplace il tente d'appliquer à tous les domaines de la physique, il développe de nombreux calculs pour tenter d'expliquer les phénomènes optiques, en particulier la polarisation rotatoire, par la théorie corpusculaire de la lumière.

Dans son *Traité de physique expérimentale et mathématique* en 4 volumes, publié en 1816, qui fit autorité dans l'enseignement et fut considéré comme la somme de la physique de l'époque, il déclare chercher à ramener l'explication de tous les phénomènes aux attractions et répulsions moléculaires.

Il appartient alors à toutes les sociétés scientifiques françaises et étrangères bien qu'il n'ait fait aucune découverte fondamentale. Ayant dû céder le terrain de l'optique à Fresnel à partir de 1817, il reste fermement attaché aux théories des fluides électriques et magnétiques de Coulomb²¹. Son caractère difficile lui fit peu d'amis parmi les hommes de son âge et sa tendance à travailler sur des sujets que d'autres physiciens avaient déjà commencé à étudier, lui firent créer de nombreuses querelles de priorité: avec Malus²², Arago et nous le verrons plus loin, Ampère lui-même.

Il ne fut cependant pas, comme on l'a parfois présenté, un esprit irréductible qui aurait défendu jusqu'à sa mort des théories dépassées. Ainsi d'après F. Lefort, « ce fut sur des notes obtenues de Fresnel lui-même qu'il exposa au cours de la Sorbonne le principe des interférences, l'explication des anneaux colorés, des accès de la diffraction, dans l'hypothèse des ondulations de la lumière »²³.

II. LA DÉCOUVERTE D'ØRSTED ET SES DIFFICULTÉS CONCEPTUELLES

1.« Ce que promet l'esprit, la nature le tient »²⁴

Nous avons vu qu'en 1813, voulant montrer que l'électricité ordinaire, le galvanisme et le magnétisme sont trois « formes d'activité » différentes des mêmes forces fondamentales, Ørsted a fait l'hypothèse d'une hiérarchie entre les différentes manifestations de ces forces fondamentales que sont les forces électriques.

20 Voir E. FRANKEL, *J.B. Biot : the career of a physicist in nineteenth century France*, thèse microfilmée, 1972, Centre A.Koyré. Paris.

21 Voir E. PICARD, *La vie et l'œuvre de J.B. Biot*, 1927.

22 Témoignage de HUMBOLDT dans les « Lettres d'A. de Humboldt à M.A. Pictet, 1795-1824 », dans *Mémoires de la Société de géographie de Genève*, t. VII, 1868, p. 195 (lettre du 17 avril 1811).

23 F. LEFORT, *Notice sur la vie et les travaux de J.B. Biot*, 1868, p. 25.

24 Phrase de Schiller citée par Ørsted lui-même à propos des découvertes scientifiques *dans la nature*, Bruxelles, 1861, traduction de J. GUILLAUME, p. 159.

En clarifiant le discours d'Ørsted, la forme la plus vive est celle de l'électricité ordinaire, puis sous forme plus « latente » on trouve le galvanisme et enfin sous une forme plus « latente » encore, le magnétisme.

Seules les « formes » semblables ou du moins voisines, pouvant interagir, il est inutile de chercher l'action de l'électricité ordinaire, c'est-à-dire de décharges électriques, sur un aimant. Sur cette forme la plus latente, seule l'action du galvanisme, c'est-à-dire d'un circuit fermé, peut être espérée.

En avril 1820 Ørsted reprend l'étude expérimentale de ce sujet qu'il avait abandonné : comment faut-il disposer l'aiguille aimantée par rapport au circuit ? Inutile d'introduire l'aiguille dans le circuit lui-même puisque cela a toujours été un échec. Il faut chercher, dit Ørsted, dans un des récits de sa découverte, une « action latérale »²⁵. Plus précisément, si cette action magnétique du courant satisfait au principe d'unité dans la nature cher à Ørsted, elle doit présenter des caractères communs avec les autres effets du courant : dégagement de chaleur et (parfois) de lumière :

« AS the luminous and heating effect of the electrical current goes out in ail directions from a conductor, wich transmits a great quantity of electricity ; so he though it possible that the magnetical effect could *likewise eradiate*. »²⁵

Il devait donc s'attendre à un effet *rayonnant* à partir de chaque section du conducteur, ce qui semble confirmé par les schémas du carnet de laboratoire d'Ørsted rapportés par K. Meyer (fig. 4). En effet, ce n'est qu'après avoir constaté dans les quatre configurations possibles (courant dans un sens ou l'autre, aiguille dans un sens ou l'autre) que la position de l'aiguille suivant un « rayon » issu du fil n'est pas la position d'équilibre, qu'il envisage une action « transversale » et non « latérale ». C'est alors que le fil est placé horizontalement au-dessus de l'aiguille et parallèlement à elle selon la disposition depuis classique (fig. 5).

Cependant, la déviation est si incertaine qu'Ørsted reste indécis devant son expérience.

En effet supposant que l'effet magnétique ne pourrait être notable qu'avec un fil incandescent, il utilisait un conducteur fin, donc de résistance élevée ce qui affaiblissait considérablement le courant dans le circuit. L'incandescence du fil devait être pour lui la preuve d'une puissance suffisante du courant électrique.

Ce n'est que lorsque l'expérience est répétée en juillet 1820 avec une pile plus puissante que la déviation de l'aiguille est indiscutable. Ørsted envoie alors un mémoire en latin aux principaux physiciens d'Europe : « Expériences sur l'effet du conflit électrique sur l'aiguille aimantée »²⁶.

Il y note l'influence de la distance de l'aiguille au fil, de la puissance de la pile, et le fait que ce nouvel effet du courant traverse les écrans de verre, de bois... contrairement aux attractions électriques ordinaires. Mais surtout, ce qui importe pour lui, c'est d'avoir la preuve de l'existence de la forme d'électricité la plus « latente » qui est la cause du magnétisme. Il la baptise « le conflit électrique » :

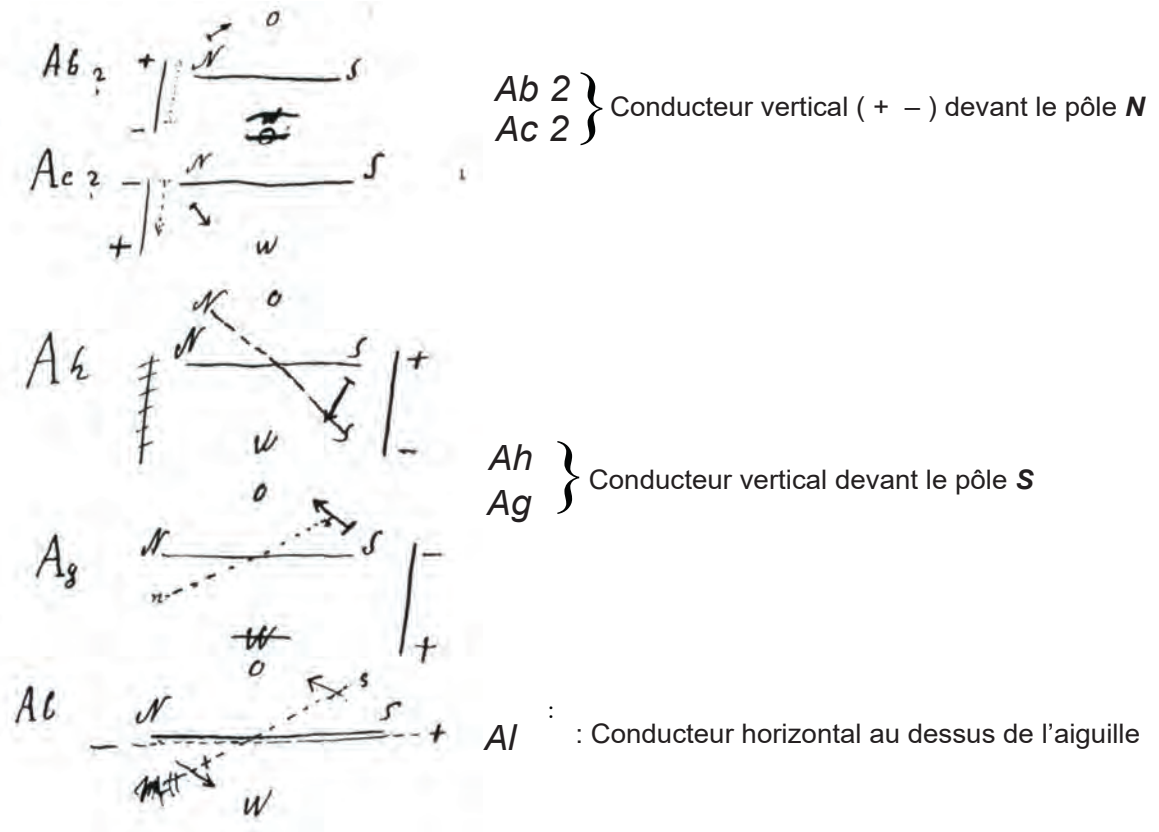
« Ainsi, les effets qui se manifestent dans le conflit électrique sont très différents de ceux que peut produire l'une ou l'autre des deux électricités »²⁷ (ordinaire ou voltaïque).

²⁵ H.C. ØRSTED, article « Thermo-electricity », dans *Edinburgh Encyclopaedia*, D. BREWSTER, t. 18, 1830, p. 575. On dispose de quatre récits par Ørsted de sa découverte, où il souligne chaque fois le rôle de la prévision dans son mode expérimental. La liste de ces récits est donnée par B. DINER dans *Ørsted and the discover of electromagnetism*, New York, 1961 et les deux principaux sont reproduits dans l'article de R.C. STAUFFER, « Speculation and experiment in the background of Ørsted's discovery », dans *Isis*, 1957, p. 33-50. Voir aussi les textes réunis par P.G. HAMAMDJIAN dans *Introduction à l'histoire des sciences*, t. II, 1971, p. 76-96.

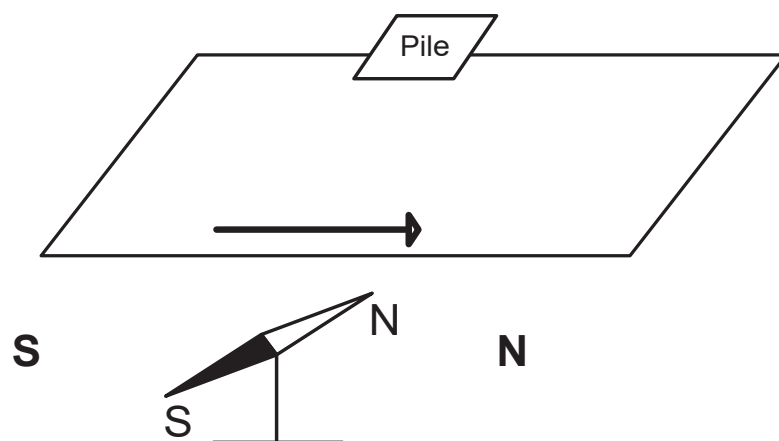
²⁶ La photocopie du texte latin, ainsi que sa traduction anglaise, se trouve dans *Isis*, t. 10, 1928, p. 435. La version française a paru dans les *A.C.P.*, t. 14, 1820, p. 417, et dans la *Collection de mémoires relatifs à la physique*, 1885, t. II, p. 1.

²⁷ *Collection de mémoires...*, t. II, p. 3.

L'ÉLECTROMAGNÉTISME DÉCOUVERTE ET PREMIÈRES RECHERCHES



H.C. ØRSTED, *Naturvidenskabelige Skrifter - Scientific Papers*. Copenhagen 1920, p. LXXIV.
Fig. 4.



Expérience d'Ørsted .
Fig. 5.

Ce « conflit », qui est une conséquence des décompositions et recompositions électriques dans le conducteur, n'est pas, contrairement au courant lui-même, circonscrit au fil. Il agit dans tout l'espace qui environne ce fil sur les corps au sein desquels se trouve la même « forme » d'électricité, c'est-à-dire les aimants, mais ajoute-t-il :

« Dans l'aimant la forme d'action des mêmes forces diffère de celle de l'électro-magnétisme, en ce qu'elles y sont presque entièrement dans l'état de repos, et qu'elles ne forment point de cercle fermé. »

Plus précisément, écrit Ørsted à Schweigger le 9 septembre 1821, si la pile fournit une grande quantité d'électricité, la propagation ondulatoire de cette électricité le long du fil ne peut se faire assez vite « pour dégager la quantité d'électricité reçue dans la bonne proportion : une partie de l'électricité va aussi se dégager *latéralement* »²⁸.

Les électricités positive et négative forment alors deux spirales opposées autour du fil, l'électricité positive agissant sur le pôle Sud et l'électricité négative sur le pôle Nord.

Bien qu'il affirmât dans son mémoire que les faits sont ainsi facilement expliqués, on conçoit que ceux qui le lurent sans avoir en tête son ouvrage de 1813 trouvèrent l'explication assez confuse.

2. Réception du mémoire d'Ørsted

Les premières réactions au mémoire d'Ørsted furent, on le comprend, l'incrédulité et le scepticisme. Pictet ayant reçu le mémoire pour la *Bibliothèque Universelle* en août 1820, décide de tenter l'expérience avec G. de La Rive à l'aide de la puissante pile de ce dernier. Arago qui était alors à Genève pour voir l'expérience de l'arc électrique, A. Marcet, A. De Candolle, P. Prévost et J.B. Dumas sont aussi là comme témoins.

D'après Marcet, « Arago n'en croyait pas un mot avant que d'essayer » et pour J.B. Dumas, « arrivés presque tous avec la conviction qu'Ørsted avait été dupe de quelque illusion, ils voyaient l'aiguille aimantée obéir à l'action du courant électrique »²⁹,

Avec l'enthousiasme que faisait naître en lui toute nouvelle découverte, Arago revient à Paris et rend compte du phénomène si longtemps cherché en vain de l'influence réciproque du magnétisme et du galvanisme à la séance du 4 septembre 1820 de l'Académie des sciences. Mais, comme récrit quelques semaines plus tard, Dulong à Berzelius, « la nouvelle a été d'abord reçue très froidement ici. On avait cru que c'était encore une rêverie allemande »³⁰, sans doute une résurgence d'une de ces idées brumeuses qui avaient fait croire en 1803 aux pôles électriques de la terre !

Pour Ampère, c'est la théorie de Coulomb des fluides magnétiques qui « écartait absolument toute idée d'action entre l'électricité et les prétendus fils magnétiques. La prévention en était au point que, quand M. Arago parla de ces nouveaux phénomènes à l'Institut, on rejeta cela comme on avait rejeté les pierres tombées du ciel (...). Ils décidaient tous que c'était impossible »³¹.

Il faut qu'Arago répète lui-même l'expérience à la séance suivante de l'Académie pour que les yeux se dessillent. Chacun alors à Paris, comme à Genève ou à Londres, répète cette expérience si simple par le dispositif qu'elle met en œuvre et si nouvelle par la manière dont elle le met en œuvre

28 Lettre à Schweigger (9 sept. 1821), *Journal für Chemie und Physik*, 1821, t. 33, p. 123-131.

29 Lettre de Marcet à Berzelius du 25 septembre 1820, citée dans la *Correspondance d'Ørsted avec divers savants*, M.C. HARDING, Copenhague, 1920, t. II, p. 264. J.B. DUMAS, *Discours et éloges académiques*, t. I, 1885, p. 261.

30 Lettre du 2 octobre 1820, citée par H. SNELDERS, « The receipt ion in the Netherlands of the discoveries of electromagnetism and electrodynamics (1820-1822) », dans *Annals of science*, 1975, vol. 32, p. 39-54.

31 *Correspondance du grand Ampère*, L. DE LAUNAY, t. II, 1936, p. 566.

Bien que le mémoire d'Ørsted fût parfaitement clair sur les prescriptions expérimentales, les « amateurs éclairés » et même des physiciens chevronnés rencontrent deux sortes de difficultés. Les premières tiennent à la physique du phénomène : la notion de courant continu n'étant pas encore établie (voir chap. I § II), on s'étonne, comme Boissgiraud, que la « colonne voltaïque », c'est-à-dire la pile seule soit sans effet sur l'aiguille ³², Ou bien on ne parvient pas à se détacher des schémas expérimentaux du 18^e siècle, comme Pictet qui est fort surpris que l'influence soit nulle, « dans le cas où il semblerait qu'elle devrait être la plus grande », c'est-à-dire lorsque l'aiguille fait partie du circuit ³³.

Les secondes difficultés tiennent à la géométrie du phénomène : le caractère révolutionnaire des forces mises en jeu est révolutionnaire et contraire aux principes de la physique newtonienne.

Ørsted avait bien précisé dans son mémoire que si l'aiguille et le fil sont parallèles dans un même plan horizontal, il n'y a pas de déviation horizontale de l'aiguille, mais tendance à un mouvement dans le plan de l'inclinaison. Cependant, lorsque Pictet répète l'expérience au musée de Florence le 7 avril 1821, il déduit des sens opposés de déviation de l'aiguille suivant qu'elle est au-dessus ou au-dessous du fil, qu'« il doit en théorie, y avoir un plan horizontal moyen (probablement celui dans lequel se trouve le fil conjonctif) dans lequel l'aiguille aimantée doit n'éprouver de sa part aucune influence déviatrice, et lui demeurer parallèle, c'est-à-dire rester dans le méridien magnétique »³⁴ !

On voit dans ce récit d'expériences, comme dans d'autres, que l'habitude est si ancrée d'utiliser la boussole seulement pour indiquer une direction horizontale, qu'il est difficile pour certains physiciens de considérer uniquement les directions relatives du fil et de l'aiguille l'un par rapport à l'autre, sans référence aux directions privilégiées que sont l'horizontale et la verticale.

III. LES THÉORIES EXPLICATIVES AVANCÉES

L'explication de son expérience par Ørsted lui-même ne fut pas reprise par les autres physiciens. Elle était trop intimement liée à l'ensemble de son système d'explication des phénomènes physiques ; trop obscure dans ses fondements : « I must confess I do not quite understand it » reconnaît Faraday dans son historique de l'électromagnétisme ³⁵. Enfin, ce qui en ressort de plus clair est que l'électricité en tant que telle agit directement sur le magnétisme. Or toutes les interactions en physique se produisent entre entités de même nature.

Trois autres types d'explications furent avancés respectant ce principe : l'identité entre l'électricité et le magnétisme, la magnétisation temporaire du fil conducteur qui réduit le phénomène à un phénomène magnétique, et enfin l'hypothèse d'Ampère sur l'existence de courants dans les aimants qui en fait une interaction entre courants.

1. L'identité entre électricité et magnétisme

Comme exemple de ce type d'explication, on peut citer l'Allemand Poenitz pour qui les expériences de magnétisation par le courant électrique « paraissant fournir une preuve indirecte en faveur

32 BOISSGIRAUD, « De l'action de la pile sur l'aiguille aimantée », dans *A.C.P.*, t. 15, 1820, p. 279 (mémoire lu le 9 novembre 1820).

33 PICTET, « Note des rédacteurs faisant suite au mémoire d'Ørsted », dans *Bibliothèque Universelle*, t. 14, 1820, p. 281.

34 PICTET, « Quelques expériences faites au musée de Florence... », dans *Bibliothèque Universelle*, t. 17, 1821, p. 25.

35 FARADAY, « Historical sketch of electro-magnetism », dans *Analys of Philosophy*, n.s., t. 2, 1821, p. 107.230

de l'opinion que lorsqu'on magnétise le fer par l'électricité, celle-ci devient, par certaines modifications, une force magnétique »³⁶,

Cette paraphrase de l'expérience ne peut mener à aucune vérification expérimentale, mais il n'en est pas de même pour les amateurs italiens Gazzeri, Ridolfi et Antinori qui expérimentent avec une certaine frénésie après avoir vu l'expérience d'Ørsted reproduite par Pictet en Italie. Ils cherchent des liens entre les différents effets du courant électrique (chimique, thermique et magnétique) et constatant que l'effet magnétique et l'effet thermique se produisent toujours simultanément, le marquis Ridolfi suggère que « l'électrique pourrait bien être le calorique plus le magnétique »³⁷.

Cette hypothèse les amène à tenter le processus inverse : recomposer l'électricité « par synthèse » avec un aimant porté au rouge. Aucune production d'électricité n'ayant pu être décelée, Ridolfi qualifie lui-même son hypothèse d'« opinion hasardée et hardie ».

Les opinions de ce style disparaissent rapidement de la scène devant les résultats obtenus par les théories de la magnétisation du fil et surtout la théorie d'Ampère. Des procédés d'identification aussi sommaires ne pouvaient mener à une pensée expérimentale très féconde.

2. La magnétisation temporaire du fil conducteur

Cette hypothèse, qui fut retenue par la majorité des expérimentateurs, présentait deux mérites d'une part elle ramenait l'inconnu au connu et d'autre part elle ouvrait une voie à la vérification expérimentale, à savoir chercher la distribution d'aimants susceptible de produire sur une aiguille aimantée la même action que le fil conducteur.

Berzélius, qui refuse les tourbillons d'Ørsted, est le premier à noter que la magnétisation du fil ne peut se faire que dans le sens de sa largeur et non, comme pour les aimants habituels dans celui de la plus grande dimension. Plus précisément, puisque l'effet magnétique est opposé suivant que l'aiguille est au-dessus ou au-dessous du fil, il suppose que « l'état magnétique intérieur, sur la coupe transversale du conducteur, est celui de deux aimants appliqués par leurs pôles opposés l'un contre l'autre »³⁸ (fig. 6).

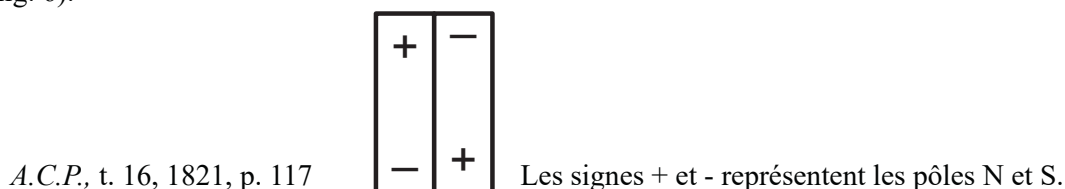


FIG 6.

Cette hypothèse de deux axes magnétiques opposés et accolés est partagée par Davy et Schweigger³⁹. Cette rencontre montre que la symétrie circulaire de l'expérience d'Ørsted n'a pas été perçue. En effet si l'expérience limite matériellement l'action du fil à deux positions symétriques de l'aiguille, le fil ne présente pas de « côté » privilégié.

36 POENITZ, « Recherche des causes qui rendent le fer magnétique lorsqu'on le traite mécaniquement », dans *Bibliothèque Universelle*, t. 17, 1821, p. 288.

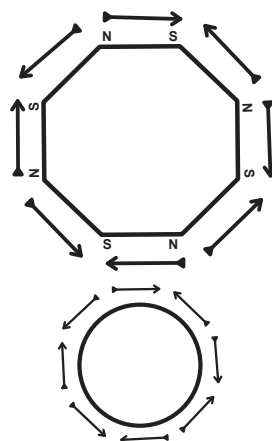
37 GAZZERI, RIDOLFI, ANTINORI, « Expériences électro-magnétiques », dans *Bibliothèque Universelle*, t. 16, 1821, p. 114 et 77.

38 « Lettre à M. Berthollet sur l'état magnétique des corps qui transmettent un courant d'électricité », dans *A.C.P.*, t. 16, 1821, p. 116.

39 DAVY, « On the magnetic phenomena produced by electricity », dans *Philosophical Transactions*, t. III, 1821, p. 7. SCHWEIGGER, « Sur l'électro-magnétisme », dans *Bibliothèque Universelle*, t. 16, 1821, p. 197.

Ørsted répond lui-même en septembre 1821 à Berzélius que les conducteurs cylindriques agissent de façon identique dans toutes les directions et que « nulle distribution de pôles ne s'y laisse découvrir »⁴⁰.

Reprenant la configuration magnétique de Berzélius, Prechtl la perfectionne en montrant qu'un fil plié suivant le contour d'un polygone régulier peut être aimanté sous l'action d'un aimant avec une alternance de pôles N et S à ses sommets (fig. 7). Ce « magnétisme transversal » appliqué

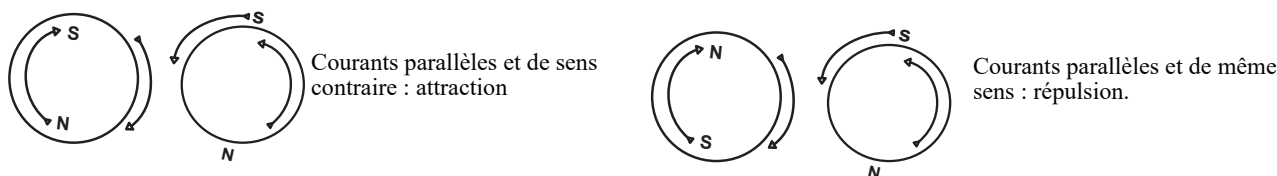


Annals of Philosophy, 2^e s., t. 4, 1822, p. 2.

Fig. 7.

au cas limite qu'est la circonférence du fil conducteur suggère encore une succession d'aimants. Pour expliquer l'impossibilité de mettre en évidence des pôles distincts, « l'activité de la pile permettrait aux pôles de se décaler en chaîne »⁴¹.

C'est sans doute ce même argument de la similitude du rôle joué par tous les points de la circonférence qui conduit Wollaston à supposer pour sa part un « courant électro-magnétique » autour du fil de sens lié à celui du courant, notion vague mais qui semble s'apparenter à la précédente⁴² (fig. 8).



Quarterly Journal of science, vol; 10, 1821, p.123

Fig. 8;

En France, c'est J.B. Biot qui soutient avec le plus de vigueur cette magnétisation du fil conducteur. Sans faire d'hypothèse sur la distribution magnétique à l'intérieur du fil, il est convaincu que l'action du fil est due à « une véritable aimantation moléculaire imprimée aux particules des corps métalliques »⁴³. Le but ultime pour lui est de décomposer l'action d'une tranche du conducteur sur un pôle magnétique en une somme d'actions infinitésimales suivant la loi de Coulomb.

40 « Considérations sur] 'électromagnétisme», dans *Bibliothèque Universelle*, t. 18, 1821, p. 11 et aussi « Expérience électromagnétique », dans *A.C.P.*, t. 22, 1823, p. 201.

41 PRECHTL, « On the fundamental magnetic phenomena electrical conrictting wire, or on the transverse electrical charge», dans *Annals of Philosophy*, n.s., t. 4, 1822, p. 1-6 (Résumé de ses mémoires parus dans les t. 67 et 68, 1821, des *Annalen der Physik und der Chemie* de Gilbert).

42 WOLLASTON ne publia pas de mémoire à ce sujet. Une courte note dans *Quarterly Journal of science*, vol. 10, 1821, p. 363. ainsi qu'un commentaire de DAVY (mémoire cité note 39) donnent un aperçu de ses idées qui incitèrent Faraday à tenter des expériences sur la rotation du fil conducteur.

43 *Précis élémentaire de physique*, 3^e éd., 1824, t. II, p. 773 et Coll. Mém., t. II, p. 127.

S'il n'a pas atteint ce but, il a cependant donné la loi d'action entre une portion infinitésimale de courant et un pôle magnétique, connue sous le nom de loi de Biot et Savart et que nous étudierons dans le § V.

Bien que peu à peu supplantées par la théorie électromagnétique d'Ampère, ces théories qui présentent le grand avantage d'expliquer qualitativement l'expérience d'Ørsted « sans (souligne Precht) avoir recours à aucune hypothèse sur les courants électriques, ou sur certaines propriétés de ces courants »⁴⁴ sont encore défendues plusieurs années plus tard. C'est essentiellement Biot, et dans une moindre mesure Pouillet qui maintiennent leur position fondée sur une certaine conception de la structure des théories physiques.

3. L'hypothèse d'Ampère

Contrairement à la plupart des physiciens qui tentent de réduire l'électromagnétisme au magnétisme, Ampère suppose comme fondement du nouveau phénomène une action entièrement nouvelle : l'action entre courants. Nous verrons dans le chapitre suivant comment à partir de l'action d'un conducteur sur l'aiguille, il est amené à conjecturer l'existence de courants électriques dans le globe terrestre pour expliquer l'orientation habituelle de cette aiguille vers le Nord, puis dans les aimants eux-mêmes suivant des cercles perpendiculaires à l'axe de l'aimant.

Son premier but est ainsi réalisé : donner une théorie du magnétisme qui ne fait pas intervenir les fluides magnétiques. Le mémoire qu'il publie dans les *Annales de Physique et de Chimie* d'octobre 1820⁴⁵ contient les fondements de cette théorie et décrit les nouveaux phénomènes qui en sont déduits : action de la terre sur un circuit électrique, action entre deux circuits, action d'une hélice...

La fécondité de l'hypothèse d'Ampère qui lui permet également de prévoir le sens de ces diverses actions, la fait adopter progressivement par un nombre de plus en plus important de physiciens. Ainsi les Néerlandais A. van Beck, J. van der Eyck et J.M. van der Heyden, le Berlinoise P. Erman et le Suisse G. de La Rive détaillent les expériences d'Ampère et lui font perfectionner la qualité de ses descriptions théoriques et expérimentales.

L'hypothèse d'Ampère posait pourtant davantage de questions a priori que celle de la magnétisation du fil : quelle est l'origine de ces courants dans les aimants ? existent-ils avant l'aimantation ? comment sont-ils disposés dans l'espace et reliés aux particules de matière ? Autant de problèmes supplémentaires à résoudre.

Ces nouveaux problèmes expliquent la réserve d'un certain nombre de physiciens qui, comme Faraday, attendent que de nouveaux résultats fassent pencher la balance en faveur de l'une ou l'autre théorie et se concentrent sur l'aspect expérimental des phénomènes.

IV. RECHERCHES EXPÉRIMENTALES QUALITATIVES

Dans son premier mémoire sur l'électromagnétisme lu à la Royal Society le 16 novembre 1820, Davy souligne déjà que « Cette découverte (d'Ørsted) ne pouvait manquer d'exciter au plus haut degré l'attention du monde savant »⁴⁶,

⁴⁴ *Annals of Philosophy*, n.s., t. 4, 1822, p. 4.

⁴⁵ *A.C.P.*, t. 15, 1820, p. 59-76, 170-208.

⁴⁶ « Sur les phénomènes électromagnétiques produits par l'électricité », dans *Collection de mémoires relatifs à la physique*, t. II, 1885, p. 64.

On assiste en effet à un foisonnement extrême de recherches menées simultanément sur le même sujet. L'étude de la pile se trouvant à la frontière de la physique et de la chimie, le nombre de savants concernés est plus important que pour un phénomène purement mécanique ou purement chimique. L'intérêt rejaillit d'ailleurs sur tous les effets de la pile : effets chimiques, lumineux...

Il s'ensuit naturellement qu'un certain nombre de découvertes sont faites indépendamment et avec quelques semaines de décalage dans une capitale ou l'autre. Les délais de publication des journaux, ou parfois la volonté même d'un homme comme Erman qui s'isole plusieurs mois « pour puiser entièrement à la source de la nature »⁴⁷, expliquent les retards de transmissions.

Plutôt que de classer ces découvertes par ordre chronologique strict, considérons l'enchaînement logique qu'elles forment dans leur ensemble.

1. Influence de la structure de la pile sur l'effet électromagnétique

Le premier facteur mis en évidence par la plupart des expérimentateurs, et par Ørsted lui-même, est le rôle de la surface des plaques qui composent la pile voltaïque. Habitues jusqu'alors à utiliser la pile surtout pour des décompositions chimiques, les chimistes recherchaient des piles comportant le plus grand nombre possible de couples cuivre-zinc afin d'obtenir une tension élevée.

Au contraire, s'étonnent-ils, la déviation de l'aiguille magnétique n'augmente pas avec le nombre de plaques mais avec leur surface. (en effet, lorsque la surface des plaques métalliques augmente, la résistance interne de la pile diminue et l'intensité du courant dans le circuit est plus élevée.)

D'où l'idée générale que l'effet magnétique dépend de la « quantité de fluide » mise en jeu tandis que les décompositions chimiques exigent une forte « impulsion » donnée à celui-ci⁴⁸. Ce sont là des ébauches de notions de courant et de tension : il était impossible à partir de ces constatations expérimentales, de mettre en évidence tous les facteurs qui interviennent et d'en abstraire ces deux notions.

2. Effets magnétiques du courant électrique

• *Attraction de l'aiguille aimantée par le fil conducteur.*

Dans le mémoire relatant sa découverte, Ørsted avait affirmé que le fil n'exerçait pas d'attraction sur l'aiguille, la seule action étant la déviation de celle-ci autour de son axe⁴⁹.

Ampère montre dès le 18 septembre 1820 qu'il existe une attraction en suspendant verticalement l'aiguille par une de ses extrémités devant le fil conducteur horizontal (fig. 16, p. 72). Boisgiraud met encore en évidence cet effet en laissant l'aiguille flotter à la surface de l'eau : lorsque le fil conducteur perpendiculaire à l'aiguille n'est pas à l'aplomb de son milieu, celle-ci se déplace jusqu'à ce que son centre soit juste sous le fil.

Cette attraction magnétique suscite relativement peu d'intérêt par rapport à l'effet d'orientation et surtout, comme nous allons le voir, par rapport aux expériences d'aimantation. Seuls les physiciens

47 *Correspondance d'Ørsted avec divers savants*, M.C. HARDING, Copenhague, 1920, t. II, p. 316.

48 Ørsted, « Nouvelles expériences électromagnétiques », dans *Bibl. Univ.*, t. 15, 1820, p. 137.- VAN BECK, « Expériences électro-magnétiques... », dans *Bibl. Univ.*, t. 17, 1821, p. 24.- PICTET, « Expériences sur certaines modifications du calorique... », dans *Bibl. Univ.*, t. 16, 1821, p. 176 et 289.- MOLLET, « Extrait de deux mémoires lus à l'Académie de Lyon en juillet et août 1821 », dans *Journal de Physique*, t. 93, 1821, p. 368.

49 *Coll. Mem.*, t. II, 1885, p. 3.

qui recherchent une expression mathématique des forces mises en jeu, Ampère et dans une certaine mesure Pouillet, tentent d'en justifier l'existence ⁵⁰.

• *Multiplication de l'effet magnétique du courant.*

Augmenter la surface des plaques de la pile était un moyen peu pratique d'augmenter l'angle de déviation de l'aiguille : faire passer plusieurs fois le fil conducteur au-dessus et au-dessous de l'aiguille fut imaginé par Schweigger en septembre 1820. Mais le même principe se retrouve chez d'autres physiciens comme Bardi, Erman et Ampère lui-même ⁵¹.

Cet appareil appelé « multiplicateur de Schweigger » permet de mettre en évidence l'existence de courants, même très faibles. Il fut utilisé en particulier par Davy pour comparer les courants pendant des électrolyses et par Ørsted pour déterminer l'ordre d'électro-positivité des métaux ⁵².

• *Action magnétique de l'arc électrique.*

Un troisième prolongement à l'expérience d'Ørsted fut suggéré par Arago qui, comme nous l'avons vu, s'intéressait beaucoup à l'époque aux rapports entre l'électricité et la lumière : il demande aux physiciens qui disposent de piles voltaïques suffisamment puissantes pour produire l'arc électrique entre deux pointes de charbon (c'est-à-dire en fait Davy et G. de La Rive) de chercher si cet arc électrique agit sur l'aiguille comme un courant électrique ordinaire.

Cette action lui semble en effet susceptible d'être reliée au phénomène des aurores boréales ⁵³.

Ce n'est qu'en juin 1821 que Davy réussit l'expérience et sa réciproque, à savoir la déviation de l'arc lumineux sous l'action d'un fort aimant ⁵⁴. Les trois ordres de phénomènes : lumineux, électriques et magnétiques sont désormais susceptibles d'interactions simultanées.

• *Aimantation du fer et de l'acier par le courant électrique.*

Une fois prouvée par Ørsted l'action magnétique du courant, il était naturel de chercher si ce courant possède également la propriété qu'ont les aimants naturels d'aimanter le fer ou l'acier. Arago fut le premier à en apporter la preuve à l'Académie des sciences dès le 25 septembre 1820 : le fil conjonctif attire la limaille de fer tant que le circuit est fermé et aimante des aiguilles d'acier placées en croix avec lui.

Grâce à Ampère qui lui suggère de placer l'aiguille à aimanter dans une hélice parcourue par le courant, l'aimantation est considérablement renforcée, le sens des pôles de l'aiguille étant lié à celui du courant dans l'hélice ⁵⁵,

Cette aimantation par l'électricité voltaïque, découverte indépendamment par Davy et Erman quelques semaines plus tard, suscite un grand engouement chez les physiciens de second rang.

⁵⁰ Le mémoire de POUILLET, lu le 26 août 1822 à l'Académie des Sciences, ne fut pas publié. Un résumé publié dans les *A.C.P.*, t. 21, 1822, p. 77-79 et un pli cacheté déposé par Pouillet le 15 juillet précédent montrent son désir d'obtenir une force unique justifiant à la fois l'effet d'orientation et l'effet d'attraction (Notice de P. COSTAEL et C. BLONDEL, *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 288, 1979, p. 179).

⁵¹ *Journal für Chemie und Physik*, t. 32, 1821, p. 48 et *Bibl. Univ.*, t. 16, 1821, p. 197.- BARDI, *Bibl. Univ.*, t. 16, 1821, p. 302. ERMAN, *Bibl. Univ.*, t. 17, 1821, p. 182.

⁵² DAVY, *A.C.P.*, t. 1, 33, 1826, p. 276. - ØRSTED, *A.C.P.*, t. 22, 1823, p. 358.

⁵³ ARAGO, « Expériences relatives à l'aimantation du fer et de l'acier par l'action du courant voltaïque », dans *A.C.P.*, t. 15, 1820, p. 102.

⁵⁴ DAVY, « Further researches on the magnetic phenomena produced by electricity », dans *Annals of Philosophy*, 2^e s., t. 3, 1822, p. 2.

⁵⁵ *A.C.P.*, t. 15, p. 93.

Par exemple, un groupe de physiciens et « amateurs éclairés » florentins après avoir mis comme à la torture » les expériences d'Ersted, Arago et Ampère tentent de découvrir de nouveaux phénomènes. Dans un même mémoire on les voit successivement : aimanter une aiguille dans une spirale à base circulaire, puis à base carrée ou triangulaire ; tenter de l'aimanter dans des hélices qui « prolongent le fil conducteur » et qui, en fait, sont en circuit ouvert (fig. 9), plonger l'hélice dans l'eau ou entourer l'aiguille d'un tube de verre; comparer les déviations de l'aiguille suivant que le circuit comporte une électrolyse ou un fil métal métallique qui s'échauffe ...⁵⁶.

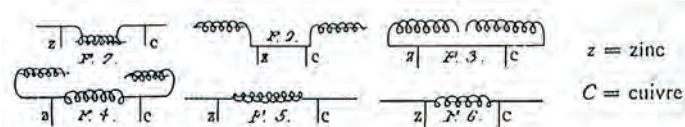


FIG. 9.

Outre la grande importance accordée aux facteurs géométriques, l'absence de notion de circuit fermé, il faut souligner la croyance qu'ils partagent avec tous les « amateurs » que la richesse du contenu expérimental doit entraîner avec plus de facilité les théories qualitatives qui sont leur but.

Il faut le sens scientifique de Pictet, qui assiste à une partie de leurs expériences pour ramener un peu d'ordre dans ce fouillis expérimental : « L'action voltaïque produit ou dégage 1° de l'électricité, 2° du calorique, 3° de la lumière, 4° du magnétisme (...) et on ne peut les bien étudier sans les considérer séparément »⁵⁷.

Ils sont cependant les premiers à montrer que l'aiguille s'aimante même lorsqu'elle est placée hors de l'hélice pourvu qu'elle soit sur son axe.

Ces expériences. d'aimantation d'aiguilles, de plaques, de cylindres, avec des hélices variables sont entreprises par de très nombreux physiciens ⁵⁸. Une de ces expériences sera reprise par Ampère comme argument en faveur de sa théorie du magnétisme : il s'agit de l'aimantation d'un anneau d'acier à l'intérieur d'une hélice refermée sur elle-même et formant un tore, réalisée par Gay-Lussac et Welter ainsi que par Van Beck ⁵⁹.

3. Action d'un aimant sur un courant

Le 25 septembre 1820 Ampère montre aux membres de l'Académie des sciences qu'un conducteur plié en spirale est alternativement attiré ou repoussé par le pôle d'un aimant suivant le sens du courant qui le parcourt. Cette expérience, fondamentale pour sa théorie de l'aimant, montre pour la première fois le phénomène réciproque de celui découvert par Ørsted.

Mais de nombreux physiciens recherchent et, pour certains, découvrent le même effet sans avoir connaissance du résultat d'Ampère. Comme le souligne Davy, qui parvient à faire rouler des rails mobiles parcourus par un courant sous l'action d'un aimant, « un corps rendu magnétique · par

56 GAZZERRI, RIDOLFI, ANTINORI, « Expériences électro-magnétiques », dans *Bibl. Uni.*, t. 16, 1821, p. 101.- Voir aussi CONFIGLIACHI *Bibl. Univ.*, t. 16, p. 76 ; RIDOLFI, *ibid.*, p. 75 ; BARDI, *ibid.*, p. 296.

57 PICTET, « Expériences faites à Florence les 16 et 20 février 1821 », dans *Bibl. Univ.*, t. 16, 1821, p. 176 et aussi p. 286.

58 VAN BECK, « Considérations et expériences sur les phénomènes électro-magnétiques », dans *Bibl. Uni.*, t. 17, 1821, p. 195, et t. 18, p. 184

- G. MOLL, « Sur des expériences électro-magnétiques », dans *Journal de Physique*, t. 92, 1821, p. 295 et 309 et t. 94, p. 379.- BÖCKMANN, *Bibl. Uni.*, t. 17, 1821, p. 283.

59 L'expérience de Gay-Lussac et Welter est décrite seulement par Ampère (voir chap. v, p. 140).

l'électricité (c'est-à-dire le fil conducteur) agissant sur l'aiguille, il était naturel d'en conclure qu'un aimant agirait sur un corps rendu magnétique par l'électricité »⁶⁰,

*Ørsted lui-même avait tenté de faire mouvoir l'« arc galvanique », c'est-à-dire le circuit dans son entier (voir note 40, chap. I), suspendu par un fil, sous l'action d'un aimant. Mais la mobilité de son appareil était trop faible pour mettre l'effet en évidence. Il prévoit également que le circuit doit s'orienter sous l'action du magnétisme terrestre mais, l'effet étant encore plus faible, il échoue, comme Ampère au début de ses recherches, sur ce point*⁶¹.

Erman par contre réussit, indépendamment d'Ørsted, à faire tourner un circuit suspendu par un fil en présentant un aimant devant une de ses faces. Mais il publie ses résultats après qu'Ampère eut publié ses propres résultats⁶².

A la demande de l'éditeur des *Annals of Philosophy*, Faraday entreprend pendant l'été 1821 de faire un historique des récentes découvertes. S'il loue l'ingéniosité expérimentale d'Ampère ainsi que les capacités prédictives de sa théorie, il en critique le fondement, c'est-à-dire l'existence de courants électriques dans les aimants comme dans le globe terrestre. Son scepticisme porte sur la réalité même des courants : « We have no proof of the materiality of electricity, or of the existence of any current through the wire »⁶³.

Pour lui, le phénomène fondamental est la force qui tend à faire tourner chaque pôle de l'aiguille en sens contraire autour du fil et la tendance réciproque du fil à tourner autour d'un pôle. S'il échoue à faire tourner le fil autour de son axe, comme cherchait à le faire Wollaston d'après sa théorie du magnétisme tournant le long de la circonférence du fil, par contre, il réussit à faire tourner continuellement un pôle d'aimant autour du fil conducteur (voir chap. IV). C'est le premier moteur à courant continu dont nous verrons qu'il eut davantage de conséquences dans le domaine théorique que dans le domaine pratique.

4. Essais d'induction

Une autre manière d'envisager la réciproque de l'action magnétique du courant fut ainsi exprimée par Fresnel : « Lorsqu'on voit un courant électrique aimanter un cylindre d'acier en parcourant une hélice métallique qui l'enveloppe, il est naturel d'essayer si un barreau aimanté ne peut pas reproduire un courant voltaïque dans l'hélice enveloppante »⁶⁴.

Après des essais positifs, l'hélice produisant une décomposition de l'eau entre ses extrémités, essais reproduits par Ampère en novembre 1820, Fresnel renonça à ses conclusions devant l'incertitude des résultats.

La recherche de courants produits « par influence » grâce à l'action d'un aimant est reprise en 1824 par Faraday et en 1825 par Colladon. Mais l'un et l'autre vont observer le galvanomètre (éloigné de la table d'expérience pour ne pas subir l'influence de l'aimant) relié aux extrémités de l'hélice *après* y avoir introduit le barreau aimanté. L'aiguille du galvanomètre est donc revenue à sa position d'équilibre et tous deux passent à côté de la découverte des courants induits⁶⁵.

60 *Coll. Mem.*, t. II, 1885, p. 72.

61 ØRSTED, *Bibl. Univ.*, t. 15, 1820, p. 140.

62 ERMAN, *Bibl. Univ.*, t. 17, 1821, p. 181.

63 FARADAY, « Historical sketch of electro-magnetism », dans *Annals of Philosophy*, 2^e s, t. 2, 1821, p. 196.

64 *Coll. MeIII.*, t. II, 1885, p. 76.

65 COLLADON, *Souvenirs et mémoires*, 1893, p. 151.

D'autres phénomènes d'induction se manifestent pendant cette période mais ne sont pas reconnus comme tels. Ainsi en 1822, Ampère montre qu'un anneau de cuivre soumis à l'influence d'un courant qui l'entoure est attiré ou repoussé par un aimant, mais cette expérience étant seulement destinée à l'étude des courants dans les aimants, il n'en étudie pas le détail (voir chap. IV, & IV-3).

Les phénomènes produits dans le « magnétisme de rotation » découvert en 1824 furent beaucoup plus étudiés aussi bien expérimentalement que théoriquement. Mais le ralentissement du mouvement de rotation d'un disque métallique sous l'action d'un aimant était un phénomène complexe et ne fut expliqué qu'après la découverte de l'induction par Faraday en 1831.

5. Action magnétique de l'électricité ordinaire

La recherche de cette action, menée vainement au 18^e siècle par analogie avec l'action de la foudre, est menée en 1820 par analogie avec l'action du fil conducteur. L'aiguille est donc placée en dehors du circuit de décharge de la batterie de bouteilles de Leyde, et transversalement par rapport au fil traversé par cette décharge.

Ørsted et Schweigger annoncent d'abord que « les étincelles ne produisent pas d'effet électromagnétique »⁶⁸. Il est vrai que lorsque l'aiguille est placée transversalement au fil (dans la position d'équilibre correspondant à l'expérience d'Ørsted), l'effet magnétique est complexe, dépendant de la distance de l'aiguille au fil, ainsi que de ses dimensions. Davy annonce cependant le 16 novembre 1820 avoir obtenu une aimantation par ce procédé, alors que le 10 novembre Arago avait déjà communiqué à l'Académie ses résultats sur l'aimantation d'aiguilles placées à l'intérieur d'hélices parcourues par une décharge électrique⁶⁹.

Encore un exemple de découverte simultanée dans ce domaine expérimental si riche de l'électromagnétisme à ses débuts. Les expériences répétées et détaillées par tous montrent que l'électricité d'origine statique et l'électricité produite par la pile ont exactement les mêmes effets magnétiques.

Pour souligner cette identité, Arago republie en 1820 dans les *Annales de Physique et de Chimie*, dont il était l'éditeur, un mémoire de Wollaston datant de 1806 et qui montre que les deux formes d'électricité ont les mêmes propriétés vis-à-vis des décompositions chimiques⁷⁰.

Le problème n'est cependant pas encore considéré comme résolu, tant que l'intensité des effets du courant électrique n'est pas reliée à la quantité de fluide qui a traversé le conducteur.

6. Etude du courant électrique

La multiplicité des expériences que nous venons d'évoquer fait peu à peu émerger la distinction entre le rôle joué par la pile et celui joué par le conducteur dans un circuit pour y faire circuler une certaine quantité d'électricité.

Les deux facteurs qui déterminent l'action de la pile, le nombre d'éléments et la surface des plaques, sont qualitativement déterminés, même s'ils ne sont reliés à aucune grandeur physique

⁶⁸ ØRSTED, *Bibl. Uni.*, t. 15, p. 137.- SCIELGGER, *Bibl. Uni.*, t. 16, 1821, p. 199.

⁶⁹ « Analyse des travaux de l'Académie Royale des Sciences, année 1820, par Delambre », dans M.A. R.S., 1818-1820, t. IV, p. 149.

⁷⁰ A.C.P., t. 16, 1821, p. 45.

Les facteurs qui déterminent ce qu'on appelle alors « le libre passage de l'électricité » dans le conducteur sont également mis en évidence de façon qualitative : ce « passage » est d'autant plus facile que la section du conducteur est grande, alors qu'une augmentation de longueur importante du fil diminue la déviation de l'aiguille.

La polarisation des piles rendait extrêmement difficile la mise en évidence des lois de la conduction, et seul Biot sut s'en abstraire dans des mesures quantitatives (voir § V). Ampère est le premier à définir clairement les notions de courant et de tension et à proposer de mesurer l'intensité du courant par la déviation de l'aiguille aimantée par rapport au méridien magnétique.

D'autres procédés sont proposés : la mesure de l'allongement d'un fil métallique ou de la longueur rougie (G. de La Rive), celle du poids de limaille de fer soulevée par une longueur donnée de conducteur (Arago et Davy), ou rappelés comme la mesure du volume gazeux dégagé dans l'électrolyse de l'eau. Mais tous ces procédés demeurent en fait qualitatifs.

La découverte de l'électromagnétisme a donc accru la connaissance qualitative des phénomènes de conduction mais n'apporte pas d'élément décisif pour permettre la mise en œuvre de la théorie de ces phénomènes.

7. Conclusion

Du foisonnement extraordinaire de recherches expérimentales qui apparaissent après l'annonce de la découverte de l'électromagnétisme, il faut souligner la richesse mais aussi les limitations.

Ces découvertes, faites pour la plupart simultanément, sont des « découvertes » au sens archéologique du terme, c'est-à-dire qu'une manipulation prolongée des appareils devait nécessairement y mener. Elles demeurent au niveau des phénomènes, de l'observation qualitative de la science électrique du XVIII^e siècle. La complexité même de ces phénomènes est souvent considérée comme un gage de richesse scientifique.

Seuls Ampère et Biot recherchent une loi mathématique exprimant l'action magnétique du courant et susceptible de permettre la prévision de nouveaux résultats expérimentaux. Il faut toutefois reconnaître qu'ils l'ont fait si rapidement qu'il y avait de quoi décourager toute tentative ultérieure !

L'expérience d'Ørsted, si facile à répéter dans le plus petit laboratoire, se montre ainsi être en quelque sorte « le révélateur » des différences de méthodes des physiciens. A un extrême, on peut situer les physiciens italiens empêtrés dans la multiplicité de leurs expériences, et à l'autre Biot qui renonce à la richesse du contenu expérimental pour se fixer la recherche d'une seule loi, à savoir la variation de la force magnétique exercée par le fil en fonction de la distance.

La multiplicité des effets du courant, qui s'oppose à une détermination simple de ses lois, eut cependant une influence positive. Berzélius le souligne en ces termes : « C'est une chose extrêmement intéressante de voir l'électricité, la lumière, le calorique, et enfin le magnétisme, se produire *en même temps et pour une même cause* »⁷¹.

Ces transformations instantanées et continues d'une « force » en une autre « force », d'une part continuent d'altérer la notion de phénomène pur telle qu'on a pu la concevoir à l'âge d'or de la mécanique, et d'autre part portent en germe le problème de la conservation et celui de la causalité.

⁷¹ BERZÉLIUS, *A.C.P.*, t. 16, 1821, p. 113.

V. LA LOI DE BIOT-SAVART-LAPLACE

Cette loi qui encore aujourd'hui, sous les seuls noms de Biot et Savart, établit l'induction magnétique créée en un point par un élément de courant fut énoncée par Biot dès le 18 décembre 1820 : la force exercée par « une tranche infiniment mince » d'un fil conducteur, située en μ (fig. 10), sur

une particule m de magnétisme (austral ou boréal) est proportionnelle à $\frac{\sin \omega}{r^2}$, où r est la distance m , et ω l'angle entre cette droite μm et le conducteur ⁷².

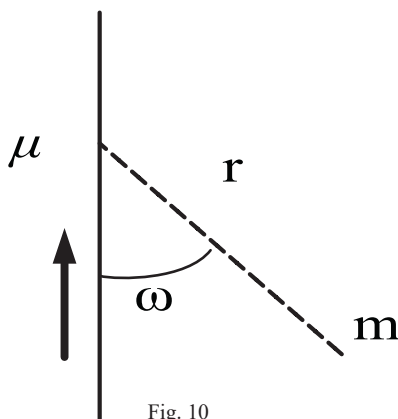


Fig. 10

Par quel enchaînement de processus expérimentaux et théoriques, Biot, Savart et Laplace ont-ils abouti à cette loi qui fit figure de rivale face à celle d'Ampère ?

Les deux mémoires lus par Biot à l'Académie des sciences les 30 octobre et 18 décembre 1820 ne furent pas publiés et le supplément « Sur l'aimantation imprimée aux métaux par l'électricité en mouvement » paru en 1824 dans la 3^e édition de son *Précis élémentaire de physique expérimentale* a été rédigé après les critiques faites par Savary et Ampère aux résultats de Biot ⁷³

Dans la première de ses lectures, Biot annonce que la force exercée par un fil conducteur infini sur un pôle magnétique est inversement proportionnelle à leur plus courte distance. Pour atteindre

⁷² En notations modernes et en unités S.I., la loi s'écrit :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

$d\vec{l}$: vecteur élément de courant
 \vec{r} : rayon vecteur de l'élément de courant au point considéré
 μ_0 : perméabilité magnétique du vide

Par contre on attribue à Laplace la loi donnant la force subie par un élément de courant $d\vec{l}$ parcouru par un courant I et placé dans un champ magnétique d'induction \vec{B} :

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

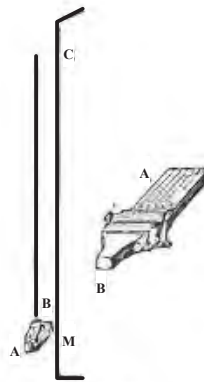
Nous verrons plus loin que cette dernière force ne doit rien à Laplace et devrait être appelée, comme c'est paradoxalement le cas dans de nombreux pays étrangers, « force d'Ampère ».

⁷³ Les mémoires de Biot sont résumés peu après leur lecture dans deux courtes notes « Sur le magnétisme de la pile de Volta » dans les *A.C.P.*, t. 15, 1820, p. 222, et dans le *Bull. Sc. Soc. Phil.*, 1820, p. 128, ainsi que dans le texte de la lecture faite par Biot le 2 avril 1821 à la séance publique de l'Académie des Sciences, publié dans le *Journal des savants*, avril 1821, p. 221. La 2^e édition du *Précis élémentaire de physique expérimentale*, parue en 1821, expose sa méthode mais contient encore l'erreur que nous allons analyser.

ce résultat, il a utilisé une méthode classique qui lui était familière : la mesure de la période des petites oscillations d'une aiguille aimantée placée à diverses distances du fil conducteur. Sous réserve d'*isochronisme*, la force subie par l'aiguille est en effet proportionnelle au carré de la période d'oscillation.

C'est par cette même méthode qu'il avait étudié la variation du magnétisme terrestre suivant la latitude avec Humboldt en 1804 et suivant l'altitude avec Gay-Lussac lors de leur fameux voyage en ballon du 24 août de la même année ⁷⁴,

La mesure de la force magnétique exercée par un conducteur posait cependant des problèmes expérimentaux nouveaux : d'abord l'action du magnétisme terrestre étant parasite pour le phénomène étudié, il l'élimine avec un puissant aimant placé à une certaine distance de l'aiguille (fig. 11). Mais c'est surtout la polarisation rapide des piles qui perturbe les mesures : il en tient compte par des moyennes entre mesures successives.



«Collection de mémoires, t. II, p. 84.

Fig. 11.

Ces expériences, pour lesquelles Biot reçut l'aide de F. Savart alors préparateur au Cabinet de physique du Collège de France où Biot était lui-même professeur, sont donc dans le prolongement direct de celles de Coulomb.

Si le processus expérimental est coulombien, le fondement du nouveau phénomène l'est aussi :

« La nature de son action (le fil conducteur) est la même que celle d'une aiguille aimantée qui serait placée sur le contour du fil dans un sens déterminé et toujours constant par rapport à la direction du courant voltaïque. » ⁷⁵.

Remarquons que cette explication de l'effet électromagnétique l'amène à prendre pour élément de courant non pas un élément longitudinal mais un élément transversal, « une tranche » de conducteur sur la circonférence de laquelle se trouvent une infinité d'aiguilles aimantées. Ce choix était d'ailleurs plus simple que celui d'Ampère (l'élément longitudinal auquel nous sommes depuis habitués).

En effet, il est toujours possible de choisir l'épaisseur de la tranche négligeable devant ses dimensions transversales alors que la longueur de l'élément longitudinal doit être à la fois grande devant ses dimensions transversales et négligeable devant la distance à laquelle on étudie son action.

⁷⁴ Voir E. FRANKEL, *J.B. Biot : the career of a physicist in 19th century France*, 1972, p. 117.

⁷⁵ *A.C.P.*, t. J 5, 1820, p. 222.

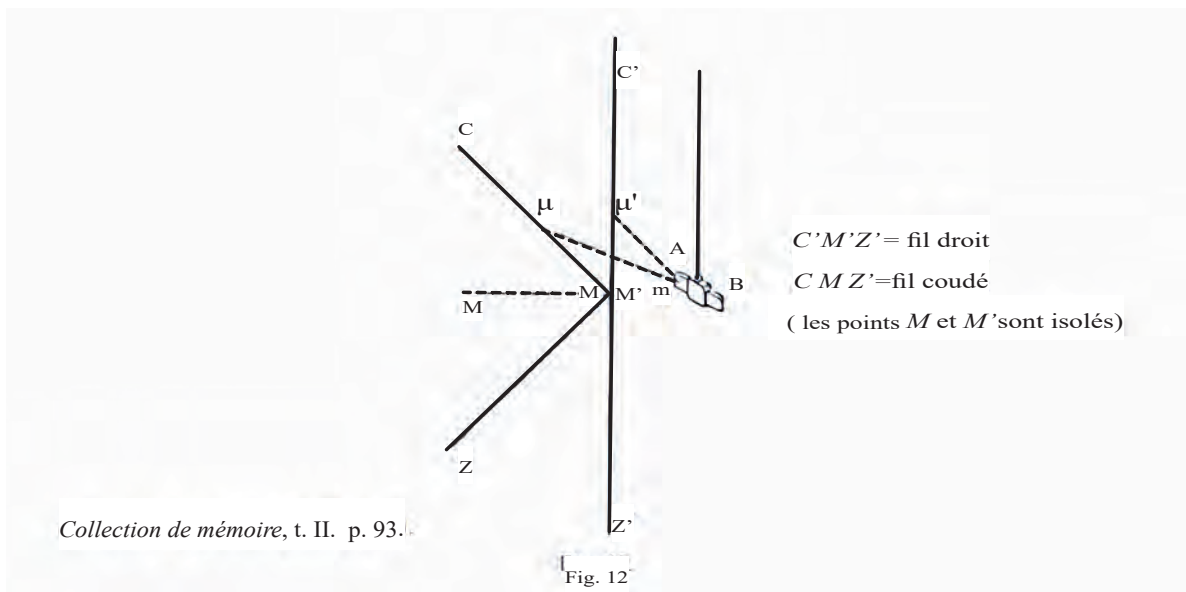
C'est de cette première loi de Biot, la variation inversement proportionnelle à la distance pour un fil infini, que Laplace déduisit que l'action d'une tranche de courant est proportionnelle d'une part à l'inverse du carré de la distance et d'autre part à une fonction de l'angle ω (fig. 10).

Laplace ne publia pas de démonstration à ce sujet, sans doute parce que la chose lui paraissait évidente. Ampère évoque son raisonnement, un raisonnement aux dimensions, pour l'appliquer à sa propre formule en 1826 ⁷⁰.

La force élémentaire $f(r, \omega)ds$ (ds étant la longueur de l'élément de courant ou hauteur de la tranche) et son intégrale sur toute la longueur du fil sont de même dimension. Or la force intégrale est de dimension -1 par rapport aux longueurs. Si les variables r et ω sont séparables dans la fonction $f(r, \omega)$, ds étant de dimension 1, on en déduit que :

$$f(r, \omega) = \frac{1}{r^2} \varphi(\omega)$$

Pour préciser la fonction $\varphi(\omega)$, Biot réalise une deuxième série d'expériences en comparant l'action d'un fil droit $Z'M'C'$ et celle d'un fil coudé ZMC sur une même aiguille (fig. 12). Faisant varier l'angle $i = CMH$, ses mesures lui indiquent une force proportionnelle à l'angle i pour le fil coudé.



En conséquence, affirme-t-il dans sa lecture du 18 décembre 1820, la force élémentaire exercée par un élément de courant est proportionnelle à $\sin \omega$. Soit finalement :

$$f(r, \omega) = \frac{\sin \omega}{r^2}$$

Le problème est que si l'on intègre $\frac{\sin \omega}{r^2} ds$ sur toute la longueur du fil coudé, on obtient une force totale proportionnelle à $\tan \frac{i}{2}$ et non pas proportionnelle directement à i . Le calcul étant à la portée de tout candidat à l'Ecole Polytechnique, on peut se demander comment a partir d'une formule intégrale fautive Biot a pu obtenir la formule différentielle correcte ! Il est clair que le facteur angulaire $\sin \omega$ a été trouvé en dehors de toute référence à cette expérience.

On peut remarquer que si l'action de l'élément de courant est maximale lorsque $\omega = 90^\circ$, opposée lorsque $\omega = -90^\circ$, il suffit de la supposer nulle pour $\omega = 0$ pour que la fonction trigonométrique la plus simple satisfaisant à cette variation soit $\sin \omega$. Cette intuition est suffisamment forte pour lui permettre de mépriser ses résultats expérimentaux et d'annoncer une formule qui leur est incompatible. On comprend que Biot n'ait pas cherché à publier ce mémoire !

La différence entre la « loi empirique »⁷⁷ de Biot (action du fil coudé proportionnelle à i) et la loi exacte (action proportionnelle à $\tan \frac{i}{2}$) s'explique par le fait que la différence entre les deux fonctions n'est que de quelques pour cent sur le domaine étudié. Or Biot, comme les autres physiciens de cette époque, n'évalue pas la précision de ses mesures bien qu'il prône dans la préface de son *Traité* de 1816 l'usage de « la doctrine des probabilités » récemment élaborée par Laplace pour « évaluer avec certitude le degré précis de confiance » qu'on peut accorder à chaque élément d'une formule⁷⁸.

Ce n'est qu'en 1823, lorsque F. Savary déduit la loi exacte pour le fil coudé de la formule d'Ampère⁷⁹, que Biot reprend ses mesures. Dans le supplément à son *Précis élémentaire de physique expérimentale* où il publie ses résultats, il expose toutes les précautions expérimentales nécessaires à ces mesures et ajoute :

« Je n'ai reconnu que successivement l'indispensable nécessité de toutes les précautions que je viens de décrire. Des premiers essais m'avaient fait aisément reconnaître que l'action du fil oblique diminuait en même temps que l'angle compris entre ses deux branches et semblait lui être proportionnelle (...). Mais à cause de l'imperfection des expériences, d'autres lois auraient pu également être admises, et l'on aurait pu, par exemple, substituer à l'inclinaison i sur l'horizontale la tangente

de la moitié de cette inclinaison, c'est-à-dire $\tan \frac{1}{2} i$ »⁸⁰.

De nombreuses autres fonctions auraient pu également être substituées à i !

La précision atteinte par Biot grâce à sa minutie expérimentale semble impressionnante au vu de ses tableaux numériques remplis de nombres à cinq chiffres significatifs. Cependant, ses résultats numériques pour la même mesure diffèrent entre eux et de la valeur théorique de plusieurs pour cent.

⁷⁷ J.B. BIOT, *Traité de physique expérimentale et théorique*, 1816, t. I, p. XII.

⁷⁸ *Ibid.*, p. xv. En 1822 Babinet écrit à propos des résultats de Biot que, grâce au chronomètre de M. Bréguet, « M. Biot a pu atteindre, pour ainsi dire, la dernière limite de l'exactitude » (*Exposé des nouvelles découvertes sur l'électricité et le magnétisme...* par MM. Ampère et Babinet, 1822).

⁷⁹ F. SAVARY, « Sur l'application du calcul aux phénomènes électrodynamiques », dans *J. Phys.*, t. 96, 1823 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 352-354. Voir le commentaire d'Ampère au sujet de cette erreur de Biot dans le chapitre v, p. 141.

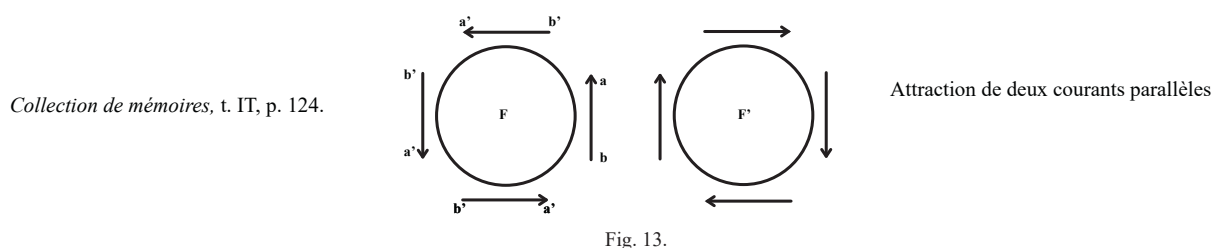
⁸⁰ *Précis élémentaire...*, 1824, p. 742 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 116.

Grâce à une série de mesures correspondant à la valeur particulière $i = 45^\circ$, il vérifie enfin que la force exercée par le fil coudé est proportionnelle à $\tan \frac{i}{2}$. Alors seulement, la formule élémentaire donnée quatre ans plus tôt concorde avec l'expérience.

Le problème de l'action d'un fil conducteur sur un aimant n'est toutefois pas considéré comme résolu par Biot :

« Il reste à trouver comment chaque molécule infiniment petite du fil conjonctif contribue à l'action totale de la tranche dont elle fait partie. »⁸¹.

Cette recherche de « la loi abstraite des forces » est sans doute très difficile mais c'est le but à atteindre même si « quelques physiciens ont prétendu qu'elle serait impossible à atteindre par une action moléculaire ; ils auraient dû seulement dire qu'ils ne savaient pas la déduire d'une action pareille »⁸². Parmi ces physiciens, le plus visé par Biot est Ampère qui prend pour principe fondamental l'action entre deux courants. Pour Biot, cette interaction s'explique simplement par les forces s'exerçant entre les aiguilles aimantées situées à la circonférence des conducteurs (fig. 13).



Enfin, critique fondamentale de Biot vis-à-vis d'Ampère : il abandonne la théorie de Coulomb et « il est forcé de considérer toutes les actions mutuelles des corps aimantés, en général, comme produites par des courants voltaïques circulant autour des molécules métalliques qui les composent, à peu près à la manière des tourbillons de Descartes, ce qui entraîne une complication d'arrangements et de suppositions si grande, qu'elle en devient presque inexprimable »⁸³.

Face à Ampère, Biot se comporte donc comme le strict continuateur de la tradition newtonienne et coulombienne. Son refus d'accepter l'importance accordée, par Ampère, au mouvement des charges électriques est corollaire du but ultime de la physique newtonienne : réduire les phénomènes à des forces centrales dont l'intensité est indépendante de l'état de mouvement ou de repos des corps.

⁸¹ *Ibid.*, p. 768 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 121.

⁸² *Ibid.*, p. 769 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 122.

⁸³ *Ibid.*, p. 771 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 125.

LES FONDEMENTS DE LA THÉORIE ÉLECTRODYNAMIQUE (11 septembre 1820 - 15 janvier 1821)

I. PRÉSENTATION DE L'ENSEMBLE DE L'ŒUVRE D'AMPÈRE (1775-1836)

1. Ses principales recherches avant l'électrodynamique

La « Notice sur la vie et les travaux d'A.M. Ampère » rédigée par Ampère lui-même en 1824, à l'âge de 49 ans, et que nous reproduisons en Annexe I (p. 171) d'après le manuscrit en grande partie inédit retrace les principales étapes de sa vie ¹.

Sa formation intellectuelle est caractérisée par la soumission aux lois de son désir et non à celles d'éventuels maîtres. Elle est marquée dès l'enfance par la très grande diversité des centres d'intérêt: littérature ancienne, poésie, création d'une langue universelle, botanique, mathématiques, sciences physiques, construction d'objets d'expériences ... C'est cependant pour les mathématiques que le jeune Ampère marque les plus nettes prédispositions ².

L'absence totale d'études suivies a certainement favorisé la tendance encyclopédique et universelle de l'esprit d'Ampère. Elle lui a aussi laissé l'habitude d'étudier avec une passion toujours renouvelée les différents sujets se présentant à lui. Par contre, comme l'a souligné Sainte-Beuve, « il n'y prit aucune habitude de discipline » ³.

Ce n'est qu'à son arrivée à Lyon en 1797, après la mort de son père dans la tourmente révolutionnaire, qu'il peut discuter des problèmes qui le préoccupent. Il crée avec Ballanche, qui restera lié d'amitié avec lui toute sa vie, une petite société littéraire et se groupe avec de jeunes amateurs de science pour étudier Lavoisier.

Ayant été admis comme « émule » à l'Académie de Lyon en 1800, il assista à la séance solennelle du 24 décembre 1801 où participèrent un grand nombre de savants italiens dont Volta. Après que Volta eut montré une série d'expériences destinées à prouver l'identité des fluides électrique et galvanique, expériences qu'il avait présentées un mois plus tôt devant Bonaparte lui-même, le jeune Ampère parla à son tour ⁴. Le procès-verbal de cette séance précise :

¹ Pour la biographie d'Ampère, voir la bibliographie des études sur Ampère en fin d'ouvrage et en particulier les références 1, 3, 5, 15 et 39.

² A l'âge de 13 ans il présente à l'Académie de Lyon un mémoire sur la rectification d'un arc de cercle, mémoire publié par L. DE LAUNAY dans le tome III de la *Correspondance du Grand Ampère* (p. 827-831).

³ *Revue des Deux-Mondes*, 4 série, t. 9, 1837, p. 393.

⁴ J.B. DUMAS, *Histoire de l'Académie royale de Lyon*, t. II, 1839, p. 163.61

« Le citoyen Ampère a commencé la lecture d'un mémoire qu'il n'a présenté que comme une faible esquisse d'un vaste système qui se lie à toutes les parties de la physique. Le mémoire doit être divisé en deux sections. L'auteur annonce que la première contiendra une explication nouvelle des phénomènes de J-électricité et de l'aimant où ils sont rappelés aux lois ordinaires de la mécanique. La seconde, destinée à l'examen de l'influence de l'électricité sur les affinités et sur la théorie de la lumière et des couleurs. Tous ceux qui ont assisté à cette lecture ont regretté que la netteté et l'étendue de la voix du lecteur et la clarté de sa prononciation ne répondissent pas à la netteté et à l'étendue des idées et à la clarté du style »⁵.

Nous publions en Annexe II (p. 175) un manuscrit des Archives de l'Académie des sciences contenant ce qui devait être l'introduction de ce mémoire qui ne fut jamais publié ni même sans doute achevé⁶.

Le grand intérêt de ce texte est de montrer qu'en 1801 Ampère refuse la théorie de Coulomb de l'électricité et du magnétisme, d'une part au nom de la complication introduite par les nombreuses forces d'attraction et de répulsion mises en jeu entre les différents fluides, et d'autre part à cause de « cette supposition même d'une action quelconque entre des corps qui ne se touchent pas ».

Le système qu'il veut construire reposera sur des bases opposées : une attraction « unique, universelle, constante » et une propagation de proche en proche selon les lois de la mécanique.

Dans des brouillons de cette période, Ampère expose des bribes de sa théorie⁷. Les molécules d'air, comme celles des autres corps, sont entourées d'une atmosphère et c'est par le déplacement de ces atmosphères que se propagent les influences électriques. Ses essais d'explication d'une propagation de proche en proche par les propriétés élastiques des fluides font aussi intervenir le calorique qui remplace l'air lorsque le vide est fait autour des corps électrisés ou magnétiques.

Ces tentatives d'Ampère pour fonder l'électricité et le magnétisme sur de nouvelles bases éclairent le discours qu'il prononça le 12 mars 1802 pour l'inauguration de son cours de physique à l'Ecole Centrale de Bourg où il venait d'être nommé et dans lequel il déclare :

« Je crois que nous devons surtout nous efforcer de réduire au plus petit nombre possible les principes qui doivent servir de base à toutes les explications et nous accoutumer à en déduire les conséquences les plus éloignées avec autant de facilité que celles qui en découlent immédiatement (...). Les expériences qui rempliront la seconde partie de ce cours, la physique mécanique, ne présenteront que des applications variées du principe général de l'équilibre et de celui du mouvement, du moins tant qu'il ne s'agira que des corps solides, des fluides coercibles et de la lumière. Le peu de progrès qu'a fait encore la théorie de l'aimant et de l'électricité m'obligera, vers la fin de cette division, à poser deux nouveaux principes, démontrés par une foule d'expériences, tant à l'égard de l'électricité que du fluide magnétique et qui suffiront pour expliquer tous les phénomènes que présentent ces deux fluides »⁸.

L'ambition d'Ampère est clairement l'intégration de l'électricité et du magnétisme dans la théorie mécanique des fluides⁹. Son intérêt pour l'électricité est encore avivé à l'époque par l'annonce du prix de 60 000 F de Bonaparte pour une découverte en électricité de l'importance de celles de Franklin et

⁵ Cité par L. DE LAUNAY, *Correspondance*, t. I, p. 109.

⁶ L'ouvrage de J.B. DUMAS comporte dans la section « Ouvrages manuscrits des académiciens titulaires par ordre de réception depuis 1800 », au nom d'Ampère : « I - Mémoires sur l'électricité, II - Application du calcul des variations... » (t. II, p. 605). Mais ce Mémoire sur l'électricité n'a pas été retrouvé.

⁷ Arch. Ac. Sc., carton X, chemise 203, et carton XII chemise 215.

⁸ *Correspondance*, t. I, p. 108-109. Ce discours fut publié pour la première fois en 1885 dans *l'Annuaire de la Faculté des Lettres de Lyon*, t. III, p. 327-347, par A. BERTRAND.

⁹ On ne peut donc retenir la phrase citée par Arago d'après un programme de cours : « Le professeur démontrera que les phénomènes électriques et magnétiques sont dus à deux fluides différents et qui agissent indépendamment l'un de l'autre », comme une preuve de l'adhésion d'Ampère à la théorie de Coulomb. (ARAGO, *Œuvres complètes*, t. II, 1854, p. 50).

Volta. A ce propos il écrit en juillet 1802 à sa femme, qui était restée à Lyon pour raison de santé : « C'est précisément le sujet que je traitais clans l'ouvrage sur la physique que j'ai commencé d'imprimer; mais il faut le perfectionner et confirmer ma théorie par de nouvelles expériences » ¹⁰.

Grâce au cabinet de physique de l'Ecole Centrale il peut en effet mener à bien des expériences de physique et de chimie ¹¹. Cependant pour obtenir le poste de professeur de mathématiques au lycée de Lyon, destiné à remplacer l'Ecole Centrale supprimée par le consulat, Ampère abandonne la physique pour les mathématiques. Son livre de physique est laissé de côté ainsi que ses théories sur l'électricité et le magnétisme.

Soutenu par Delambre et Lalande à qui il a communiqué ses premiers mémoires de mathématiques, Ampère obtient le poste tant désiré. Mais il ne retrouve sa femme que pour quelques mois car elle meurt le 13 juillet 1803. La période de vrai bonheur et de paix morale est terminée pour Ampère.

A Lyon Ampère retrouve ses amis Ballanche, Bredin, Barret, Roux-Bordier. .. avec qui il fonde en février 1804 la « Société chrétienne » profondément inspirée par l'Ecole mystique de Lyon. Pour J. Buche, historien de ce mouvement de pensée, c'est par le genevois Roux-Bordier, qui correspond avec Ampère jusqu'à sa mort en 1822, que le groupe subit l'influence de la philosophie allemande ¹². Croyant à l'analogie des lois de l'homme et de l'univers, ils sont animés par « un immense désir de synthèse et d'universelle harmonie » ¹³.

Les liens d'Ampère avec ces jeunes philosophes et scientifiques qui remontent à son premier séjour à Lyon avant sa nomination à Bourg et resteront ses seuls vrais amis pendant toute sa carrière à Paris n'ont sans doute pas été sans influencer ses premières recherches sur l'unification de l'électricité et le magnétisme, recherches quelque peu hétérodoxes par rapport à celles menées à Paris dans le prolongement des travaux de Coulomb. Sans doute son caractère le portait plus vers les synthèses audacieuses que vers les minutieux travaux expérimentaux, mais cette tendance naturelle fut certainement favorisée par son entourage.

Son intérêt pour la philosophie de la connaissance et la psychologie est alors aussi important que pour les mathématiques : en 1803 il rédige pour le concours de l'Institut un mémoire sur la décomposition de la pensée et la marche de l'esprit humain ¹⁴. Il y discute les théories de Maine de Biran avec qui il entre bientôt en correspondance. L'échange entre les deux hommes est très riche bien que le nom d'Ampère apparaisse peu dans l'œuvre de Maine de Biran.

Lorsqu'il arrive à Paris en décembre 1804, ayant été nommé répétiteur d'analyse à l'Ecole Polytechnique, Ampère considère la métaphysique comme la « science unique ». S'opposant à Condillac qui fonde la connaissance sur les seules sensations, il se sépare des disciples de Kant et de Reid car il croit profon-

10 *Correspondance*, t. 1, p. 182. (Voir aussi p. 136 et 142). Cet ouvrage de physique ne fut jamais terminé.

11 C'est pendant l'année passée à Bourg qu'Ampère acquiert l'essentiel de sa formation expérimentale. Il souligne lui-même l'importance de ce passage au laboratoire (qu'il ne fréquentera plus guère avant 1820) dans un état de ses services rédigé après ses découvertes en électrodynamique : « Obligé de faire réparer les instruments du cabinet de physique de cette Ecole et d'en faire construire de nouveaux par un artiste habile mais qui jusqu'alors n'avait travaillé qu'en horlogerie, M. Ampère acquit par ce travail cette connaissance des moyens les plus propres à atteindre le but qu'on se propose dans la construction des instruments et dans la pratique des expériences qui lui a été si utile lorsqu'il l'a appliquée à la recherche des nouveaux faits qu'il a découverts relativement aux effets de l'électricité en mouvement et qu'il a inventé les seuls instruments à l'aide desquels on peut réaliser ces faits. Le cours de physique qui était sans auditeurs lorsqu'il en fut chargé, fut très suivi quand il le fit ». (Arch. Ac. Sc., carton xxvi, chemise 393 bis).

12 J. BUCHE, *L'école mystique de Lyon 1776-1847*, Paris, 1935, p. 87.

13 J. HOURS, « Ampère philosophe et savant », dans *Bulletin de la Société des Amis d'A.M. Ampère*, 1964, p. 6.

14 Des extraits de ce mémoire ont été publiés par B. SAINT-HILAIRE dans *Philosophie des deux Ampère*, 1866, p. 333-461.

L'ouvrage contient également une étude de la philosophie d'Ampère par son fils Jean-Jacques qui fut lui-même professeur de littérature au Collège de France ainsi qu'une partie des lettres envoyées par Ampère à Maine de Biran entre 1805 et 1815.

16 *Ibid.*, p. 155. Voir aussi « La théorie philosophique des rapports d'André-Marie Ampère », A. MARCOVICH, *Revue d'histoire des sciences*, 1977, xxx, p. 119-123.

dément à la réalité du monde physique comme à celle du monde des valeurs morales. Il reprend la distinction entre les noumènes, existant indépendamment de notre pensée et les phénomènes ou qualités des noumènes qui nous les rendent sensibles. Si l'homme ne peut appréhender les noumènes, il peut cependant, pour Ampère, saisir les relations qui existent entre eux et donc les intégrer dans un système cohérent :

« On ne peut connaître des rapports des noumènes (substance, espace, temps réel) entre eux que les rapports qui sont aussi entre les phénomènes (qui nous les manifestent...) ».

Le monde réel ne peut contenir sans contradiction que des idées de rapports, dépouillés de toute subjectivité ; c'est un fait que les savants les forment et y croient ; permis aux métaphysiciens comme Kant et Berkeley de les « désobjectiver », mais c'est une immense probabilité contre eux »¹⁵.

Les rapports entre les différentes branches de la connaissance humaine, c'est-à-dire la classification des sciences, présentent pour Ampère la même objectivité que les rapports entre les noumènes. C'est pourquoi la seule recherche qui occupe son esprit presque sans interruption, de 1802 à 1836, date de sa mort, fut la quête insaisissable et perpétuellement remise à l'étude d'une classification des sciences absolue¹⁶.

Si l'intérêt d'Ampère est d'abord pour la philosophie et la psychologie (ce sont les membres de la Société d'Auteuil qu'il fréquente plus que les mathématiciens) il est cependant mathématicien de statut et doit effectuer des travaux d'analyse qui lui sont de plus en plus pénibles.

La fonction d'Inspecteur général qu'il exerce à partir de 1808 l'empêche de consacrer ses vacances à la métaphysique et la chimie, son nouveau centre d'intérêt. Il intervient cependant dans les discussions sur la nature des alcalins, soutenant dès 1809 leur caractère métallique ou sur celle du chlore, de l'iode et du fluor, reconnaissant leur statut de corps simples¹⁷.

L'année 1813 voit le passage à Paris d'Ersted puis de Davy et Faraday. Ampère se passionne alors de plus en plus pour la chimie, projetant de fonder cette science sur les mathématiques : les proportions dans lesquelles les corps se combinent doivent pouvoir s'expliquer par la structure géométrique de leurs molécules. Il suppose que les molécules sont des polyèdres réguliers aux sommets desquels se trouvent les atomes (qu'il appelle particules). Ces atomes sont des points sans dimension et centres de forces attractives ou répulsives.

La chimie est ainsi réduite à une combinatoire. Ce travail enthousiasme Ampère qui y voit le départ d'« une de ces grandes théories qui donnent une nouvelle forme à une science »¹⁸.

Mais concurremment à la rédaction de son mémoire de chimie où il démontre l'hypothèse qui porte son nom joint à celui d'Avogadro (hypothèse selon laquelle deux volumes égaux de deux gaz quelconques sous la même pression et à la même température contiennent le même nombre de molécules) Ampère doit se consacrer à nouveau aux mathématiques. En effet, une place à l'Académie est vacante ...

¹⁵ *Ibid.*, p. 155. Voir aussi « La théorie philosophique des rapports d'André-Marie Ampère »,

A. MARCOVICH, *Revue d'histoire des sciences*, 1977, xxx, p. 119-123.

¹⁶ Ce n'est qu'en 1834, deux ans avant sa mort, qu'Ampère publie son *Essai sur la philosophie des sciences ou Exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*. Il y étudie les sciences du monde matériel, ou sciences cosmologiques. Une deuxième partie publiée en 1843 par son fils comprend les sciences du monde de la pensée ou sciences noologiques. Voir « L'essai sur la philosophie des sciences d'Ampère », J. MERLEAU-PONTY, *Revue d'histoire des sciences*, 1977, xxx, p. 113-118.

¹⁷ Sur l'œuvre chimique d'Ampère, voir M. SADOUN-GOUPIL, « Esquisse de l'œuvre d'Ampère en chimie », dans *Revue d'histoire des Sciences*, xxx, 1977, p. 125-141, et D.L. GARDINER, « Ampère and his english acquaintances », dans *British Journal for History of Science*, 1965, 2, p. 235-245. Les deux principaux mémoires de chimie d'Ampère sont parus dans les *Annales de Chimie*, t. 90, 1814, p. 43-86 pour le premier et dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 1816, t. 1, p. 295-308, 373-410 et t. II p. 5-32, 105-125 pour le deuxième, l'« Essai d'une classification naturelle des corps simples ».

¹⁸ *Correspondance*, t. III, p. 455.

Ayant été élu pour remplacer Lagrange dans la section de géométrie grâce à ses mémoires sur certains types d'équations différentielles ou à dérivées partielles, Ampère recouvre une certaine liberté d'esprit.

En février 1815, il écrit à son ami Bredin :

« Je rêve alternativement de chimie et de psychologie (*sic*), en projetant toujours de m'occuper exclusivement de mathématiques (...), dans les sciences je ne puis prendre un vif intérêt qu'aux travaux qui se présentent comme pouvant en changer la face à quelques égards »¹⁹.

Son intérêt pour la philosophie se traduit alors par un enseignement de logique à l'Ecole Normale en 1816-1817 et de philosophie à la Faculté des Lettres en 1819-1820 et par un projet (un de plus ...) de rédaction d'un ouvrage à partir de ces cours.

A côté de la philosophie Ampère s'intéresse vivement au débat qui agite l'Académie des Sciences au sujet de la nouvelle théorie de la lumière de Fresnel. Si en 1815 il rédige un mémoire démontrant les lois de la réfraction à partir du principe de moindre action dans le cadre de la théorie de l'émission, il se convertit rapidement à la théorie ondulatoire. Il en devient même l'ardent défenseur avec Arago face à ce que l'oncle de Fresnel appelle « la secte des Biotistes »²⁰.

Fresnel avait d'ailleurs dû sentir en Ampère un soutien potentiel car il lui avait envoyé ses premières recherches sur l'aberration.

Les deux hommes se rapprochaient aussi par leur intérêt commun pour la psychologie et bientôt Fresnel fréquenta les mêmes cercles intellectuels qu'Ampère.

Ampère aida encore Fresnel en lui suggérant l'hypothèse de la transversalité des ondes lumineuses pour expliquer les phénomènes de polarisation et en le faisant entrer à la Société Philomatique en 1819.

Les liens entre les deux savants s'accrurent encore lorsque Fresnel logea chez Ampère même qui louait une partie de sa maison²¹. Il est certain que les discussions communes entre Ampère et Fresnel sur la nature de l'éther et le mode de vibrations qu'il propage étaient encore présentes à l'esprit d'Ampère lorsque celui-ci apprend la découverte d'Ørsted.

En 1820 Ampère est donc un mathématicien qui voudrait laisser son nom en tant que philosophe et dont les travaux les plus importants sont sans doute ceux de chimie !

2. L'œuvre électrodynamique d'Ampère

Cette œuvre qui fut réalisée essentiellement entre 1820 et 1826 ne le fut pas de manière continue d'une part pour des raisons propres au développement de la théorie mais aussi pour des raisons externes : les problèmes familiaux, de santé et professionnels ont souvent empêché Ampère de consacrer à l'électrodynamique le temps et les réflexions qu'il aurait voulu lui consacrer.

Les deux textes par lesquels cette œuvre est principalement connue sont le premier mémoire qu'il publia après la découverte d'Ørsted en 1820 dans les *Annales de Chimie et de Physique* : « De l'action exercée sur un courant électrique par un autre courant, le globe terrestre ou un aimant »²² et l'ouvrage paru en 1826 sous le titre *Théorie des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience* qui est le point d'orgue de ses recherches.

¹⁹ *Ibid.*, p. 887.

²⁰ *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, 1866-1870, t. II, p. 842. Sur le rôle d'Ampère dans la théorie ondulatoire, voir J. ROSMORDUC, « Ampère et l'optique : une intervention dans le débat sur la transversalité de la vibration lumineuse », dans *Revue d'histoire des sciences*, XXX, 1977, p. 159-167.

²¹ Mme Chevreux) - *André-Marie Ampère et Jean-Jacques Ampère, Correspondance et souvenirs (de 1805 à 1864)*, 1875, p. 277-278 et *Correspondance du Grand Ampère*, t. II, p. 642.

²² *A.C.P.*, t. 15, 1820, p. 59-76, 170-208 (Le mémoire est reçu à l'Académie le 26 décembre 1820)

Entre ces deux mémoires fondamentaux, Ampère a publié un grand nombre d'articles qu'il a dispersés dans des revues, dont certaines peu diffusées, et qui possèdent souvent des versions différentes dans des tirés à part ou des recueils collectifs ²³.

Du point de vue de l'éditeur, comme de celui de l'archiviste ou de l'historien, Ampère était un auteur difficile : il remaniait sans cesse ses textes, en promettait des qui n'arrivaient jamais, ne datait presque jamais ses manuscrits et faisait modifier l'impression en cours. Il a laissé derrière lui une somme de manuscrits qui remplissent 38 cartons aux Archives de l'Académie des Sciences et qui sont les témoins de cette pensée bouillonnante, intéressée par tout ce qui présente un caractère de nouveauté dans quelque domaine que ce soit. Ces manuscrits témoignent aussi d'une pensée qui accumule, conserve, mais se soucie davantage du classement des diverses branches du savoir humain que de celui des documents qui en sont la trace ²⁴.

Sa correspondance publiée par L. de Launay en 1936 témoigne de la tourmente que fut sa vie intérieure, de la multiplicité de ses préoccupations concomitantes, mais aussi des précisions ou mises au point qu'Ampère apporte à sa théorie à la suite des observations et objections que lui font G. et A. de La Rive, H. Davy, M. Faraday, S. van der Eyck...

L'aventure électrodynamique d'Ampère se divise assez naturellement en deux périodes. La première de septembre 1820 à janvier 1821, qui couvre le présent chapitre, est dans sa brièveté, celle de la création, de l'invention, d'une fougue extraordinaire dans la recherche. Les principaux éléments de la théorie sont d'ailleurs mis en place à la fin de cette première période interrompue par une grave maladie pulmonaire d'Ampère au printemps 1821.

Son esprit est alors exclusivement consacré à fonder la nouvelle théorie du magnétisme sur les actions entre courants: au cours des seize séances de l'Académie des Sciences qui eurent lieu entre le 18 septembre 1820 et le 15 janvier 1821, les membres de la Classe des Sciences mathématiques et physiques purent entendre douze lectures d'Ampère sur ce sujet ! ²⁵.

Comment expliquer cette précipitation ? Tout d'abord le caractère passionné d'Ampère le portait à se donner entièrement à son nouveau sujet d'étude. Mais cette fois le sujet le méritait d'autant plus à ses yeux qu'il remettait en cause un des fondements des sciences physiques, créait un rapport nouveau entre des phénomènes distincts et introduisait un germe d'unification au sein de la physique. En outre, et peut-être est-ce là le plus important, la découverte d'Ersted lui faisait reprendre son rêve de jeunesse sur l'unification de l'électricité et du magnétisme, avec l'espoir d'être le « génie capable d'y appliquer le calcul qui a produit tant de merveilles entre les mains des mathématiciens modernes » ²⁶ qu'il appelait de ses vœux en 1801.

Ce souci de faire connaître ses recherches, presque au jour le jour et avec une hâte qui lui fait souvent anticiper les résultats expérimentaux, s'explique aussi par le souci de dater publiquement ses découvertes.

²³ Pour la bibliographie de l'œuvre électrodynamique d'Ampère, voir à la fin de l'ouvrage. Une première réunion d'articles a été réalisée dans le *Recueil d'observations électro-dynamiques* en 1822 par Ampère, mais l'outil le plus accessible pour aborder l'œuvre d'Ampère est la *Collection de mémoires relatifs à la physique*, t. II, 1885, et t. III, 1887, réalisée par J. Joubert.

²⁴ Les manuscrits d'Ampère ont subi plusieurs classements, dont celui de Joubert à la fin du XIX^e siècle et sont regroupés par chemises répertoriées. Tous les domaines sont abordés : mathématiques, mécanique, électrodynamique, bien sûr, mais aussi pièces de théâtre, chimie, grammaire... ainsi qu'une grande partie de sa correspondance (toutes les lettres d'Ampère situées dans ces cartons ne sont d'ailleurs pas reproduites dans l'édition de sa correspondance), de ses papiers administratifs et familiaux ...

²⁵ *Procès-verbaux des séances de l'Académie des Sciences*, t. VII, années 1820-1823, Hendaye, 1916, p. 83-130. Voir aussi les « Notes de M. Ampère sur les lectures qu'il a faites à l'Académie des Sciences », dans *J. Phys.*, t. 91, 1820, p. 166-169 (reçu par l'Académie le 27 novembre 1820). Ces notes qui ne figurent pas au sommaire de la revue ont été reproduites par C. BLONDEL, « Sur les premières recherches de formule électrodynamique par Ampère », dans *Revue d'histoire des sciences*, XXXI, 1978, p. 60-62.

²⁶ Annexe II p. 176.

Nous avons vu en effet que l'engouement des physiciens pour l'électromagnétisme a été général à travers toute l'Europe. A Paris, c'est avec Biot qu'Ampère est en concurrence dans la recherche d'une formule pour les forces électrodynamiques ou électromagnétiques, et cette concurrence fut particulièrement vive.

Les mémoires lus par Ampère pendant cette période n'ayant pas été publiés, de nombreux historiens ont souligné la difficulté de reconstituer la genèse de sa théorie par Ampère durant ces semaines cruciales ²⁷.

Le mémoire des *Annales de Chimie et de Physique* déjà cité mêle d'une manière qui semble au premier abord inextricable les résultats de ses lectures faites entre le 18 septembre et le 6 novembre 1820. Il présente de nombreuses traces d'une composition inachevée ou du moins très rapide : retours en arrière, descriptions d'appareils conçus dans un autre but que celui qui leur y est assigné, hypothèses contradictoires ... Ampère en dit lui-même : « Je sais bien que mon mémoire n'est pas rédigé assez clairement ; cela vient de ce que je l'ai écrit avec une hâte extrême et par morceaux détachés que j'ai ensuite réunis comme j'ai pu » ²⁸.

Nous avons tenté de reconstituer avec l'aide de textes d'Ampère non répertoriés jusqu'ici ²⁹ et par comparaison entre les manuscrits (pour la plupart non datés) et le mémoire publié, la suite des expériences et raisonnements d'Ampère. Ce découpage, suivi d'un nouveau montage propre à l'historien, présente l'inconvénient d'éliminer le sentiment de confusion et de jaillissement au profit d'une clarté peut-être factice. Mais cette analyse était indispensable à la compréhension de la genèse de la théorie d'Ampère.

Après sa maladie, Ampère tourne les yeux vers sa chère métaphysique et c'est l'annonce de la découverte par Faraday des phénomènes de rotations continues (rotation d'un aimant autour d'un courant et réciproquement) qui réveille son intérêt pour l'électromagnétisme.

S'ouvre alors une deuxième période où Ampère défend sa théorie face aux oppositions qu'elle a suscitées aussi bien de la part des physiciens français qu'étrangers et où il tente d'en étendre le champ et d'en améliorer les fondements.

La fin de cette période (1823-1826) est essentiellement consacrée aux développements analytiques et aux tentatives faites pour rendre sa théorie complète et rigoureuse afin de pouvoir l'exposer de façon linéaire et cohérente. Elle se termine par la rédaction de la *Théorie des phénomènes électrodynamiques*

27 « As Maxwell noted, Ampère preferred to relate the Baconian rather than the true history of the discovery », J. AGASSI, « Towards an historiography of science », dans *History and theory (Studies in the philosophy of history)* Beiheft 2. - « Unfortunately, Ampère never revealed, either in his published papers or in his Correspondance, how the idea came to him that magnetism was electricity in motion », L.P. WILLIAMS, « Ampere's electrodynamical model », dans *Contemporary physics*, n° 2, vol. 4, 1962, p. 117.

28 *Correspondance*, t. II, 1936, p. 566.

29 Il s'agit des « Notes de M. Ampère sur les lectures qu'il a faites à l'Académie des sciences » (voir n. 25) et de l'« Analyse des mémoires lus par M. Ampère à l'Académie des Sciences, dans les séances des 18 et 25 septembre, des 9 et 30 octobre 1820 », dans *Annales Générales des Sciences Physiques*, t. VI, Bruxelles, 1820, p. 238-257. Les autres sources imprimées sont :

— « Note sur les expériences électro-magnétiques de M.M. (Ersted, Ampère, Arago et Biot) », dans *Annales des Mines*, t. V, 1820 p. 535-558, reproduit avec quelques modifications dans *Recueil*, p. 69-92, et en version tronquée dans *Coll. Mem.*, t. II, p. 136-140. A propos de cet article, parfois attribué à GILLET DE LAUMONT, Ampère écrit en février 1821 : « M. Gillet de Laumont ayant fait un petit précis sur les travaux relatifs à ces deux phénomènes (électro-magnétisme), j'y ai joint deux notes sur mes derniers mémoires qui ne sont point encore publiés. Ces notes paraîtront incessamment dans le *Journal des Mines* pour qui M. Gillet de Laumont avait fait cette note. C'est là qu'on peut trouver quelque chose de ces mémoires ». (*Correspondance*, t. II, p. 567). En fait, Ampère a revu et corrigé l'ensemble de l'article (Arch. Ac. Sc, Carton IX, chem. 186 et carton X, chem. 189).

— L'« Analyse des travaux de l'Académie Royale des Sciences pendant l'année 1820, partie mathématique, par Delambre », dans *M.A.R.S.*, t. IV, 1818-1820, p. 137, volume édité en 1824. En fait cette notice fut rédigée par Ampère lui-même en février 1821 (manuscrit autographe carton VII, chem. 156) et publiée le Jour de la séance publique de l'Académie, le 2 avril 1821 (*Bibliothèque Universelle*, t. 17, 1821, p. 16).

— « Notice sur les expériences électro-magnétiques de M. Ampère et Arago, lue à la séance publique de l'Académie Royale des Sciences de Paris, le 2 avril 1821 », dans *Bibliothèque Universelle*, t. 17, 1821, p. 16-20.

composée à partir de plusieurs mémoires publiés entre 1820 et 1825³⁰. D'autres textes restés inédits jusqu'alors ou composés spécialement tendent à en faire le traité de cette partie de la physique qu'Ampère aurait voulu laisser. En octobre 1826 il écrit à son fils :

« Il faudrait que ce volume, qui suppose les faits généraux connus, fût précédé d'une exposition des faits, avec la description des appareils et l'histoire des découvertes successives. Alors j'aurai le Traité complet en deux volumes dont je rêve depuis trois ans. Je ne sais si je le ferai jamais. En attendant l'ouvrage de Monferrand supplée à cette première partie. »³¹.

En fait il est difficile de considérer cet ouvrage comme un traité dans la mesure où seuls les résultats d'Ampère sont exposés. Après avoir décrit l'obtention de la formule donnant la force entre deux éléments de courants à partir de quatre expériences fondamentales, il en déduit par intégration les forces entre courants finis, entre aimants (loi de Coulomb) et entre un aimant et un courant (loi de Biot). Il y démontre aussi ce qui fut longtemps appelé « le théorème d'Ampère », à savoir l'équivalence entre un circuit électrique et un feuillet magnétique³².

Posant les fondements d'une nouvelle branche de la physique, l'ouvrage se veut également un modèle méthodologique :

« (Cet écrit) contient un enchaînement de calculs et d'expériences qui sera toujours, à ce que je crois, comme M. Fresnel me le disait un jour, un modèle de la marche à suivre dans les sciences. »³²

La « marche à suivre » en question est exposée dans les premières pages de l'ouvrage qui ont été rédigées par Ampère en 1823 pour un mémoire resté inédit³⁴ :

« Observer d'abord les faits, en varier les circonstances autant qu'il est possible, accompagner ce premier travail de mesures précises pour en conclure des lois générales uniquement fondées sur l'expérience, et déduire des lois ainsi obtenues, indépendamment de toute hypothèse sur la nature des forces qui produisent les phénomènes, la valeur mathématique de ces forces, c'est-à-dire la formule qui les représente, telle est la marche qu'a suivi Newton. (...) C'est elle qui m'a servi de guide dans toutes mes recherches sur les phénomènes électro-dynamiques. »³⁵.

Nous allons pouvoir comparer les affirmations épistémologiques d'Ampère avec la reconstitution de sa démarche dans l'élaboration de sa théorie.

30 Il s'agit des mémoires lus les 4 et 26 décembre 1820 (qui n'ont pas été publiés part), les 10 juin 1822, 22 décembre 1823, 12 et 28 novembre 1825, ainsi que de la « Note sur l'Exposé sommaire des nouvelles découvertes ... » publiée dans le *Recueil d'observation électro-dynamiques* en 1822. L'ouvrage fut reproduit dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* pour l'année 1823, publié en 1827, t. VI, p. 175-388, mais Ampère y apporta plusieurs modifications : le titre devient *Théorie mathématique des phénomènes...*, les Notes à la fin de l'ouvrage sont remaniées, et la table des matières est supprimée. Il fut réédité en 1883 et en 1958 (éd. A. BLANCHARD d'après l'édition des M.A.R.S.).

31 *Correspondance*, t. II, p. 689 (Ampère fait référence au *Manuel d'électricité dynamique* de J.-F. Monferrand, 1823). Dans un « Résumé de ses travaux », rédigé en 1824 il écrit : « M. Ampère se propose de remplacer (le *Recueil d'observations électro-dynamiques*) par un traité complet d'électricité dynamique qui paraîtra incessamment chez M. Méquignon » (*Arch. Ac. Sc.*, carton X, chem. 205).

32 Sur ce qu'on appelle aujourd'hui « théorème d'Ampère », voir P.G. FAMAMDJIAN, « Contribution d'Ampère au « théorème d'Ampère », dans *Revue d'histoire des sciences*, XXXI, 1978, p. 249-268.

33 *Correspondance*, t. III, p. 946.

34 Mémoire daté du 24 novembre 1823 (les Procès-verbaux ne mentionnent pas de lecture d'Ampère à cette date) qui, d'après J. Joubert, renferme les principaux résultats publiés dans le Mémoire du 22 décembre 1823. (*Coll. Mem.*, t. III, p. 5, n.1)

35 *Théorie des phénomènes électro-dynamiques*, 1826, p. 4 et *Coll. Mem.*, t. III, p. 3.

II. L'ÉLIMINATION DES FLUIDES MAGNÉTIQUES (SEPTEMBRE-OCTOBRE 1820)

1. Premier mémoire d'Ampère : 18 et 25 septembre 1820

—18 septembre

a) Les deux « résultats généraux » de l'expérience d'Ersted: rotation et attraction

Ersted avait constaté que l'angle dont déviait l'aiguille aimantée, à laquelle le conducteur était parallèle, augmentait avec la puissance de la pile. Mais il n'avait pas clairement séparé les deux effets magnétiques agissant sur l'aiguille : celui dû à la terre, et celui dû au courant électrique. En effet, sa vision du phénomène était davantage dynamique que statique, un tourbillon entraînant chaque pôle en spirale autour du fil conducteur.

Au contraire, Ampère, en mécanicien habitué à étudier les conditions de l'équilibre d'un corps, décompose d'abord l'action subie par l'aiguille en ses deux composantes. La première question qu'il se pose est de savoir ce que vaudrait l'angle de déviation si le fil agissait seul sur l'aiguille : « celui (de l'aimant ou du conducteur) qui est mobile tend à se mouvoir de manière que les directions du conducteur et de l'axe de l'aimant *forment un angle droit* »³⁶.

Cet effet de rotation, ou « action directrice », qui tend à mettre en croix le fil et l'aimant, est « le premier résultat général » découlant des expériences d'Ersted.

Le « deuxième résultat général », à savoir l'effet d'attraction exercé par le fil sur l'aiguille, a été obtenu après un détour théorique :

« La première réflexion que je fis lorsque je voulus chercher les causes des nouveaux phénomènes découverts par M. Ersted, est que l'ordre dans lequel on a découvert deux faits ne faisant rien aux conséquences des analogies qu'ils présentent, nous pouvions supposer qu'avant de savoir que l'aiguille aimantée prend une direction constante du sud au nord, on avait d'abord connu la propriété qu'elle a d'être amenée par un courant électrique dans une situation perpendiculaire à ce courant, et qu'on découvrit ensuite la propriété qu'elle a de tourner constamment au nord celle de ses extrémités qui se portait à gauche du courant : l'idée la plus simple, et celle qui se présenterait immédiatement à celui qui voudrait expliquer la direction constante du sud au nord, ne serait-elle pas d'admettre dans la terre un courant électrique, dans une direction telle que le nord se trouvât à gauche d'un homme qui, couché sur sa surface pour avoir la face tournée du côté de l'aiguille, recevait ce courant dans la direction de ses pieds à sa tête, et d'en conclure qu'il a lieu, de l'est à l'ouest, dans une direction perpendiculaire au méridien magnétique ? »³⁷.

La connaissance de l'origine du magnétisme terrestre suscitait beaucoup d'espoir, même chez un théoricien comme Ampère, dans la mesure où la détermination des causes de variations dans l'inclinaison et surtout la déclinaison était fondamentale pour la mesure précise des longitudes. De cette origine électrique du magnétisme terrestre il déduit ensuite : « Si c'est en cela que réside véritablement la cause (de l'action) directrice de la terre sur une aiguille magnétique, c'est en cela aussi que réside la cause de l'action directrice d'un aimant : *d'où il suit qu'un aimant quelconque n'est qu'un assemblage de courants*

³⁶ *Annales Générales des Sciences Physiques*, t. vi, 1820, p. 238.

³⁷ *A.C.P.*, t. 15, 1820, p. 203.

galvaniques qui ont lieu dans des plans perpendiculaires à son axe, et qui se meuvent suivant des courbes fermées et rentrantes »³⁸.

On doit donc pouvoir imiter les effets d'un aimant à l'aide d'un fil conducteur formant des cercles parallèles dont les centres sont sur un même axe. Mais c'est sans preuve expérimentale et avec comme supports sa seule foi et son seul enthousiasme qu'Ampère l'affirme dans sa lecture du 18 septembre :

« Je décrivis les instruments *que je me proposais de construire*, et entre autres des spirales et des hélices galvaniques (...). J'annonçais que ces dernières *produiraient* dans tous les cas les mêmes effets que les aimants (...), *en sorte que je réduisis tous les phénomènes magnétiques à des effets purement électriques »*³⁹.

L'usage du futur, du conditionnel, ou d'un présent intemporel est, nous le verrons, fréquent chez Ampère quand il s'agit d'expériences !

Les courants électriques doivent donc manifester toutes les propriétés des aimants. Or si le champ magnétique terrestre, étant uniforme pour un observateur à la surface de la terre, ne crée que des effets de rotation, par contre les aimants manifestent en outre des effets d'attraction, de manière même encore plus naturelle que les effets de rotation. Un courant électrique doit donc, lui aussi, manifester cet effet attractif. C'est là le « second résultat général » prévu par Ampère.

Dès sa première lecture il s'écarte donc radicalement de l'hypothèse la plus généralement retenues par ses contemporains, à savoir la magnétisation temporaire du fil conducteur. D'après le brouillon représenté figure 14, il semble avoir envisagé cette hypothèse simultanément à la sienne et donne la liste des expériences qui s'y opposent : celles de Gay-Lussac et Welter, Davy et Erman pour le magnétisme tournant de Wollaston et celle d'Ørsted pour le magnétisme transversal de Prechtel⁴⁰. Mais au moment où il lit son premier mémoire, Ampère n'a pas encore connaissance de ces expériences et le 8 avril 1822 il reconnaît dans sa lecture publique à l'Académie des sciences :

« J'avais examiné cette hypothèse (de la magnétisation du fil) avant de me décider pour celle que j'ai adoptée, et je l'avais rejetée plutôt d'après *l'ordre général des faits* qu'en m'appuyant sur des preuves directes »⁴¹.

Aucune « preuve directe » ne pouvait en effet être alors invoquée.

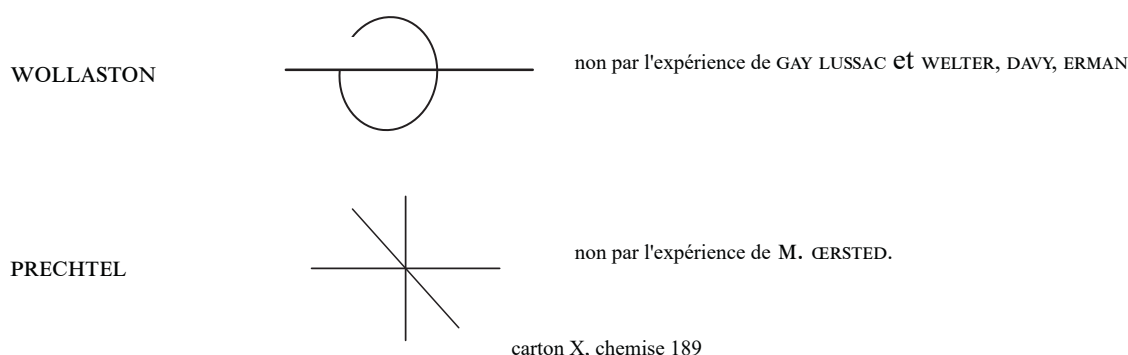


Fig: 14

38 *A.G.S.P.*, p. 242.

39 *J. Phys.*, t. 91, 1820, p. 166.

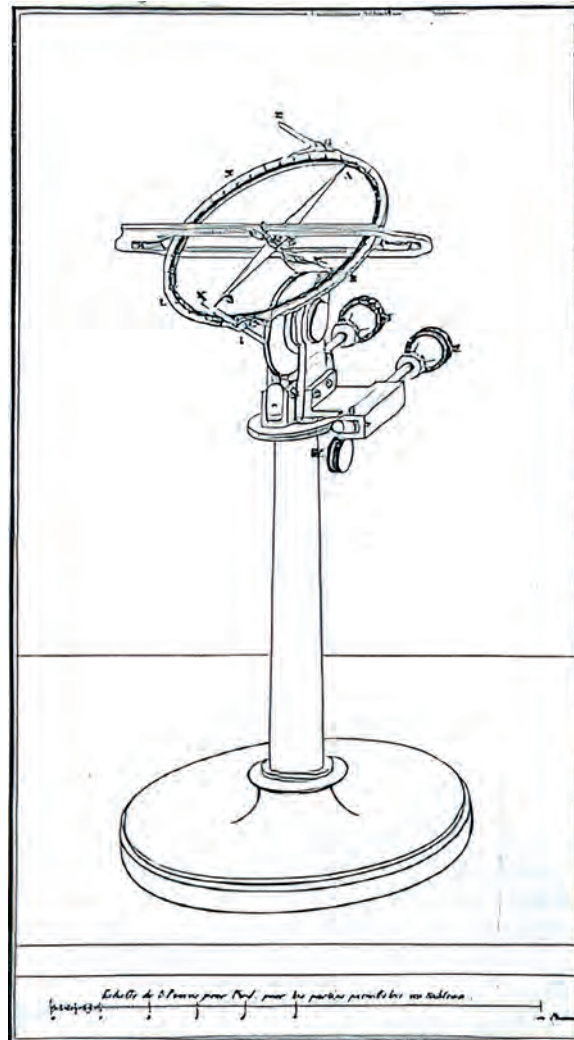
40 *Arch. Ac. Sc.*, carton X, chem. 189.

41 *J. Phys.*, t. 94, 1822, p. 66, et *Coll. Mem.*, t. II, p. 243.

b) *Mise en évidence expérimentale des deux effets : rotation et attraction*

Son but est le montrer de manière indépendante les deux actions d'un conducteur sur un aimant, la rotation découverte par Ørsted et attraction qu'il a déduite de son hypothèse sur l'origine électrique du magnétisme.

Pour vérifier l'hypothèse selon laquelle l'action directrice du fil conducteur sur l'aiguille tend à les mettre en croix, il lui faut éliminer l'action du magnétisme terrestre. La boussole ordinaire, sensible à la composante horizontale du champ magnétique terrestre, ne peut être facilement inclinée car elle est souvent constituée d'une aiguille simplement posée en son centre, évidé en cône, sur une pointe métallique verticale. Par contre l'aiguille d'inclinaison, sensible à la composante dans le plan vertical du méridien magnétique, est souvent *traversée* en son centre par l'axe de rotation horizontal; elle peut donc être



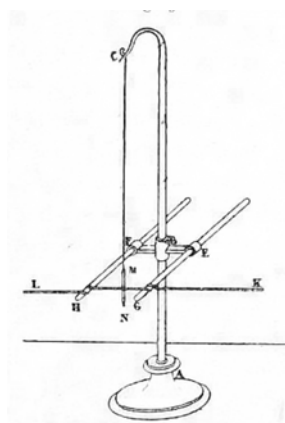
Fig; 15

inclinée et prendre une position quelconque par rapport au méridien. C'est sans doute en expérimentant avec ce type de boussole qu'Ampère en vient à concevoir son *aiguille astatique* mobile dans un plan quelconque (fig. 15) :

« Or, si on met l'axe de l'aiguille astatique, parallèlement aux résultantes des actions du globe, l'aiguille ne pourra se mouvoir que dans le plan perpendiculaire de ces résultantes. Ainsi l'action du globe sera détruite et l'aiguille restera indifférente dans toutes ses positions, c'est-à-dire qu'elle sera parfaitement astatique. Alors, si on approche un courant galvanique, son action directrice se fait seule sentir sur l'aiguille, et l'expérience montre qu'elle devient toujours exactement perpendiculaire à la direction du courant »⁴².

Pour montrer ensuite l'action attractive indépendamment de l'effet de rotation, il faut que l'aiguille soit en position d'équilibre vis-à-vis de cet effet de rotation, c'est-à-dire perpendiculaire au fil.

Cette deuxième expérience consiste simplement à suspendre verticalement une aiguille aimantée vis-à-vis d'un fil conducteur horizontal. L'aiguille est attirée par le fil si ses pôles sont dans la position que leur donnerait le courant, et repoussée dans le cas contraire (fig. I 6).



A.C.P., t. 15, p. 352, pl. 5, fig. 9.

Fig. 16

Ampère montre ainsi un pur phénomène d'attraction électromagnétique, dans lequel les deux pôles magnétiques opposés sont en même temps attirés ou repoussés. Cette expérience était impossible à comprendre avec l'explication donnée par Ørsted de son expérience.

c) Action de la pile

La dernière expérience très probablement décrite ce même jour concerne l'action de la pile elle-même sur l'aiguille, action qui « était alors positivement niée par un habile physicien (sans doute Boissier) dans un mémoire lu à l'Institut et plein d'ailleurs d'observations très intéressantes »⁴³. Nous avons vu que sans la notion de circuit fermé, les physiciens considéraient séparément la pile et le conducteur.

Plaçant une boussole ordinaire au-dessus de la pile, Ampère montre que « le courant qui existe dans la pile voltaïque, de l'extrémité négative à l'extrémité positive, avait sur l'aiguille aimantée la même influence que le courant du conducteur qui va, au contraire, de l'extrémité positive à la négative »⁴⁴.

⁴² A.G.S.P., p. 239.

⁴³ Lettre inédite d'Ampère, 7 juillet 1822, Arch. Ac. Sc., carton x, chem. 201.

⁴⁴ A.C.P., t. 15, p. 67.

Cette expérience est fondamentale pour deux raisons : la première, théorique, est que c'est la première expérience, depuis la découverte de la pile, qui montre une propriété commune à la pile et au fil conducteur qui en relie les pôles. En effet, il a déjà été remarqué (chap. II, p. 21) que les effets jusqu'alors connus du courant (calorifiques, chimiques ou lumineux) étaient localisés en certains points du circuit. Au contraire, ici, c'est le *même effet* qualitativement et quantitativement (puisque la déviation de l'aiguille a la même valeur tout le long du circuit), qui est manifesté *en même temps* par la pile et par le conducteur qui en relie les pôles.

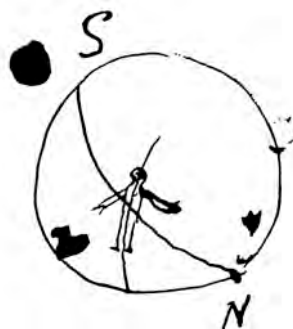
En outre cet effet est polarisé. La phrase d'Ampère citée plus haut ne montre pas nettement que ce sens circule continuellement du conducteur à la pile, et dans un brouillon de ce mémoire, il écrit même que « la pile elle-même agit sur l'aimant comme le fil conducteur, *sauf le sens opposé dans lequel elle est parcourue par le courant électrique* »⁴⁵.

Il utilise donc encore l'ancien formalisme qui considère la pile et le conducteur comme deux objets sinon indépendants, du moins disjoints théoriquement, dans lesquels les effets sont apparemment opposés puisqu'ils sont disposés l'un en face de l'autre.

Mais dans la rédaction finale du mémoire, la notion de courant en tant que circulation à travers l'ensemble pile-conducteur est établie clairement: si on place une aiguille au-dessus de la pile et une autre au-dessus du conducteur, « on voit le pôle austral de chaque aiguille *se porter à gauche du courant* près duquel elle est placée ; en sorte que quand la seconde est au-dessus du conducteur, elle est portée du côté opposé à celui vers lequel tend l'aiguille posée sur la pile, à cause que les courants ont des directions opposées dans ces deux portions du circuit (...). Dès qu'on interrompt le circuit, elles reviennent aussitôt, dans les deux cas, à leur position ordinaire »⁴⁶.

Le deuxième intérêt de cette expérience, mentionné par Ampère lui-même, est de fournir un instrument pour mesurer ce nouvel effet du courant : « il propose aux physiciens de mettre habituellement une aiguille aimantée sur la pile, afin de reconnaître par ses mouvements si le courant est bien établi et quelle est son énergie. Il appelle cet instrument galvanoscope »⁴⁷.

Cette dénomination est remplacée dans la rédaction du mémoire par celle de « galvanomètre », sans doute avec l'espoir de rendre l'instrument quantitatif⁴⁸, ce qui en fait ne se réalise qu'en 1837 avec la boussole des tangentes de Pouillet. Pour évaluer la force d'un courant, on utilisait jusqu'alors l'électrolyse mais ce procédé présentait l'inconvénient de modifier le courant à étudier.



Le « bonhomme d'Ampère », carton VIII, ch. 156. (Arch. Ac. Sc.).

Fig. 17

45 Voir n. 43.

46 A.C.P., p. 68.

47 A.G.S.P., p. 240.

48 A.C.P., p. 67.

Outre l'intensité de l'effet, que ce galvanomètre mesure sans l'affaiblir, l'aiguille permet d'en déterminer le sens grâce au célèbre « observateur d'Ampère » tel que « si l'on se place par la pensée dans la direction du courant, de manière qu'il soit dirigé des pieds à la tête de l'observateur, et que celui-ci ait la face tournée vers l'aiguille ; c'est constamment à sa gauche que l'action du courant écartera de sa position ordinaire celle de ses extrémités qui se dirige vers le nord, et que je nommerai toujours pôle austral de l'aiguille aimantée »⁴⁹. La figure 17 extraite d'une feuille éparsée dans les cartons d'Ampère donne une image de ce fameux « bonhomme d'Ampère » dessiné par l'auteur de ses jours.

Le mémoire lu par Ampère sept jours seulement après qu'Arago eut montré à l'Académie l'effet du « conflit électrique » sur l'aiguille aimantée est donc déjà riche aussi bien du point de vue théorique qu'au point de vue expérimental.

Cependant il reconnaît lui-même que « la plus grande partie de ces vues (qui furent communiquées à l'Académie Royale des Sciences dans la séance du 18 septembre 1820) n'a été que plus tard confirmée par l'expérience »⁵⁰.

Ainsi les spirales et les hélices, comme l'aiguille astatique⁵¹, n'étaient pas encore réalisées. Seuls l'action électromagnétique de la pile et l'effet attractif du courant ont pu être vérifiés expérimentalement. C'est « l'ordre général des faits », c'est-à-dire la cohérence du système et non l'expérience qui justifie son choix a priori de réduire le magnétisme à l'électricité.

– 25 septembre

La séance suivante de l'Académie des Sciences, le 25 septembre fut la séance « historique ». Au soir de ce lundi 25 septembre, Ampère écrit à son fils :

« Tous mes moments ont été pris par une circonstance importante de ma vie. Depuis que j'ai entendu parler pour la première fois de la belle découverte de M. Ørsted, professeur à Copenhague, sur l'action des courants galvaniques sur l'aiguille aimantée, j'y ai pensé continuellement, je n'ai fait qu'écrire une grande théorie sur ces phénomènes et tous ceux déjà connus de l'aimant, et *tenter des expériences indiquées par cette théorie*, qui toutes ont réussi et *m'ont fait connaître autant de faits nouveaux*. Je lus le commencement d'un mémoire à la séance de lundi il y a aujourd'hui huit jours. Je fis les jours suivants, tantôt avec Fresnel, tantôt avec Despretz, les expériences confirmatives; je les répétai toutes vendredi soir chez Poisson où s'étaient réunis les deux de Mussy, Rendu, plusieurs élèves de l'Ecole Normale, le général Campredon, etc.

Tout réussit à merveille ; mais l'expérience décisive que j'avais conçue comme preuve définitive exigeait deux piles galvaniques; tentée avec des piles trop faibles chez moi avec Fresnel, elle n'avait point réussi. Enfin hier j'obtins de Dulong qu'il permît à Dumotier de me vendre la grande pile qu'il faisait construire pour le cours de physique de la Faculté et qui venait d'être achevée.

Ce matin l'expérience a été faite chez Dumotier avec un plein succès et répétée aujourd'hui à quatre heures, à la séance de l'Institut.

On ne m'a plus fait d'objection et voilà une nouvelle théorie de l'aimant qui en ramène, par le fait, tous les phénomènes à ceux du galvanisme. Cela ne ressemble en rien à ce qu'on en disait jusqu'à présent.

Je le réexpliquerai demain à M. de Humboldt, après-demain à M. de Laplace au bureau des Longitudes »⁵².

49 Ibid.

50 A.C.P., p. 196.

51 A.C.P., t. 16, 1821, p. 120 et Recueil, p. 100.

52 Correspondance, t. II, p. 562.

d) *Spirales et hélices*

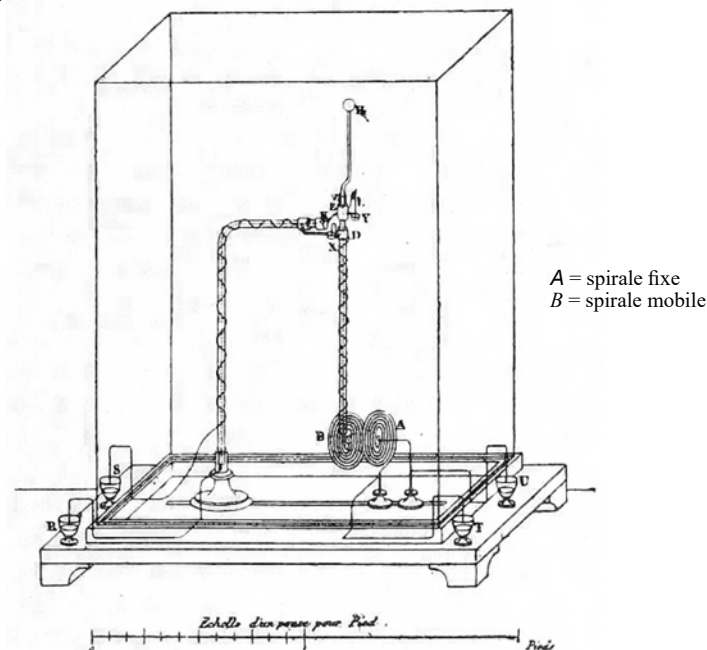
Quelles sont ces « expériences indiquées par cette théorie, qui toutes ont réussi et (lui) ont fait connaître autant de faits nouveaux » ?

Outre les deux expériences déjà exposées, destinées à montrer séparément les effets de rotation et d'attraction, il s'agit essentiellement de celles déduites de cette « grande théorie » qui explique les propriétés des aimants par des courants circulaires dans des plans perpendiculaires à leur axe magnétique.

Encore influencé par le modèle dipolaire de l'aimant ce sont *les pôles* qu'il tente de reproduire séparément: « M. Ampère avait disposé en spirale les conducteurs afin que (...) cette forme spirale se rapprochât de celle des courbes fermées que parcourent les courants électriques autour des pôles d'un aimant » ⁵³

.Avec ce dispositif, il constate que « suivant le sens dans lequel on fait passer le courant dans une telle spirale elle est fortement attirée ou repoussée par le pôle d'un aimant qu'on lui présente de manière que la direction de son axe soit perpendiculaire au plan de la spirale, selon que les courants électriques de la spirale et du pôle de l'aimant sont dans le même sens ou en sens contraire » ⁵⁴. Ainsi la spirale se présente comme l'image électrique d'un pôle magnétique.

Quant à « l'expérience décisive qu'il avait conçue comme preuve définitive (et qui) exigeait deux piles galvaniques », il ne peut s'agir que de l'expérience précédente où le barreau aimanté est lui-même remplacé par une deuxième spirale. Voulant ainsi faire interagir deux courants électriques, il crut d'abord qu'il lui fallait deux circuits et donc



A.C.P., t. 15, p. 352, pl. 5, fig. III.

Fig. 18

Ce n'est que dans la séance du 9 octobre qu'il fait remarquer qu'« au lieu de deux courants électriques excités par deux piles différentes, il vaut mieux se servir de deux portions d'un même courant et d'une

⁵³ A.G.S.P., p. 247.

⁵⁴ A.G.S.P., p. 242.

seule pile; outre l'avantage avec le même nombre de paires d'avoir des courants dont l'intensité est double, on a celui de ne pouvoir se tromper sur la direction des courants » ⁵⁵.

En fait l'intensité du courant n'est pas doublée, mais les résistances de jonction étant moins nombreuses, elle est effectivement supérieure à ce qu'elle vaudrait dans chacun des deux circuits formés avec la moitié de la pile totale.

Grâce à la pile de la Faculté, l'expérience peut être réalisée avec deux spirales et il déclare à la séance que « M. Ampère a découvert ce fait, que deux courants électriques s'attirent lorsqu'ils vont dans le même sens, et qu'ils se repoussent s'ils vont en sens contraire » ⁵⁶.

Cette conclusion générale dépasse quelque peu le résultat expérimental, qui ne concerne que les spirales, et anticipe le résultat de l'expérience sur deux conducteurs parallèles qui n'est montrée à l'Académie que le 9 octobre 1820 ⁵⁶.

Peu après la spirale, Ampère construit « une hélice roulée autour d'un tube de verre suspendu à son milieu sur une pointe très fine comme l'aiguille d'une boussole ». ⁵⁷. Cette disposition devait être très instable et elle est remplacée par une suspension verticale comme sur la figure 19.

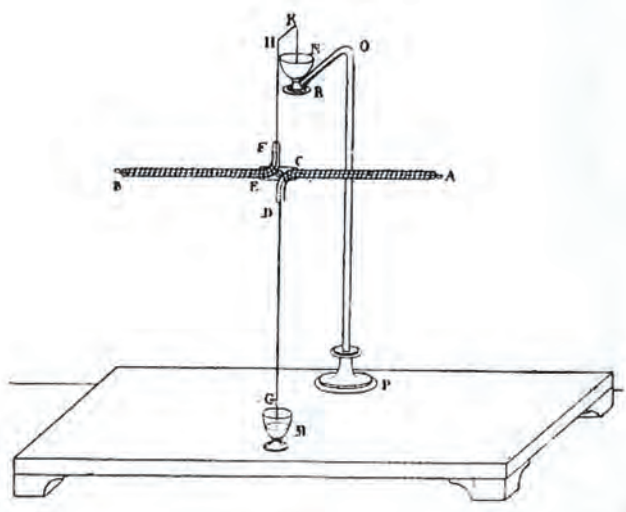


Fig. 19

A.C.P., t. 15, p. 224, pl. 2, .
fig. 3.

L'hélice destinée à imiter la totalité de l'aiguille aimantée n'est plus marquée comme la spirale par la conception dipolaire de l'aimant.

Cette hélice se comporte exactement comme un aimant lorsqu'on la place devant un autre aimant. Mais par contre la tentative pour montrer l'action du magnétisme terrestre sur l'hélice s'est soldée par un échec : « à l'égard de la force directrice de la terre, l'appareil n'était pas assez mobile, et cette force agissait par un bras de levier trop court pour produire l'effet désiré » ⁵⁷. Cependant dans un passage du même mémoire, rédigé postérieurement, il attribue cet échec à une cause plus théorique : « Je n'ai pas réussi dans les premières expériences que j'ai faites pour faire mouvoir le fil conducteur d'un courant électrique par l'action du globe terrestre, moins peut-être par la difficulté d'obtenir une suspension assez mobile, que parce qu'au lieu de chercher dans la théorie qui ramène les phénomènes de l'aimant à ceux

⁵⁵ A.G.S.P., p. 244.

⁵⁶ A.C.P., p. 212 et Ann. Mines, 1. v, 1820, p. 542.

⁵⁷ A.C.P., p. 172. Une partie des instruments et circuits mobiles utilisés par Ampère dans son cours au Collège de France à partir de 1824 ont été conservés au laboratoire de physique du Collège de France.

des courants électriques, la disposition la plus favorable à cette sorte d'action, *j'étais préoccupé de l'idée d'imiter le plus que je le pouvais la disposition des courants électriques de l'aimant* dans l'arrangement de ceux sur lesquels je voulais observer l'action de la terre; cette seule idée m'avait guidé dans la construction de l'instrument »⁵⁸.

C'est donc bien la théorie du magnétisme qui est recherchée par Ampère dans cette toute première phase de ses recherches. Il rejette hors du champ de la science les fluides magnétiques, qui sont « une supposition gratuite »⁵⁹ au profit des « phénomènes de l'aimant pur »⁶⁰ ou phénomènes électriques.

e) *Les Conclusions apportées par Ampère à son premier mémoire* ⁶¹.

Dans ces conclusions en neuf points Ampère affirme que tous les phénomènes que présentent entre eux les aimants, le globe terrestre et les courants électriques sont expliqués par la loi selon laquelle deux courants parallèles de même sens s'attirent et de sens contraires se repoussent.

De cette loi générale (qui en fait n'a été vérifiée que sur les spirales), il déduit une deuxième loi qui permet d'expliquer l'action rotative exercée par les courants :

« Quand les fils métalliques que (les courants) parcourent ne peuvent que tourner dans des plans parallèles, chacun des deux courants tend à amener l'autre dans une situation où il lui soit parallèle et dirigé dans le même sens »⁶².

Cette deuxième loi n'est pas plus vérifiée expérimentalement que la première.

Le caractère prédictif de ces conclusions, soigneusement caché par des formules intemporelles en 1820, est revendiqué par Ampère lui-même quelques années plus tard. En mars 1823 il écrit à A. de La Rive le plaisir qu'il a à voir « une espèce de prévision » de ses développements ultérieurs dans ce premier mémoire et il ajoute même :

« C'est surtout en comparant ces conclusions (lues le 25 septembre 1820) avec les résultats de toutes les expériences faites et de tous les calculs faits depuis que je m'applaudis de l'avoir écrite parce que j'ai toujours pensé qu'il a autant de mérite à concevoir le premier des vérités que des faits découverts ensuite viennent confirmer qu'on avait, à l'époque de cette sorte de divination comme l'appelle M. Biot (...) moins de données pour y parvenir »⁶³.

Le rapprochement entre cette confiance d'Ampère et l'introduction de son ouvrage de 1826 montre que l'expérience est loin de jouer le rôle qu'il lui assigne alors !

2. Deuxième mémoire : 9 octobre 1820

Le deuxième mémoire d'Ampère, lu le 9 octobre, dut sembler assez disparate à ses auditeurs. Il contient à la fois des remarques sur des problèmes expérimentaux, des réponses aux premières critiques, des vues théoriques sur la nature du courant électrique et enfin ses premiers résultats dans la recherche d'une formule. C'est presque le journal de bord de ses recherches quotidiennes qu'il fait partager à ses collègues.

58 A.C.P., p. 188. ;

59 « Mémoire sur l'expression mathématique des attractions et des répulsions des courants électriques », lu le 4 décembre 1820, *Coll. Mem.*, t. II, p. 133. 1

60 *Correspondance*, t. II, p. 563 (lettre du 18 décembre 1820).

61 Ces Conclusions sont publiées à part dans le *Journal de Physique*, t. 91, 1820, p. 76-78 (paru le 11 novembre 1820).

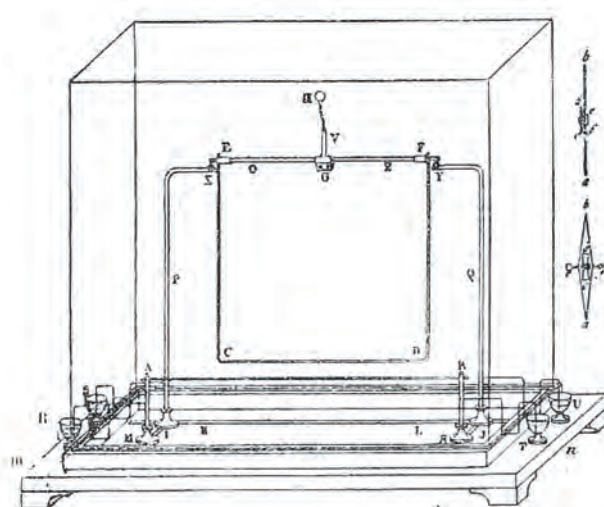
62 A.C.P., p. 210.

Les résultats en sont dispersés dans le texte des *Annales de Chimie et de Physique* et nous reconstituons ce mémoire essentiellement grâce à l'Analyse de ses mémoires parue dans les *Annales générales des Sciences physiques* (voir note 29) et aux manuscrits.

C'est d'abord la confirmation expérimentale des résultats prévus le 25 septembre qui est réalisée devant les académiciens : « Il fit voir sur deux courants électriques rectilignes les mêmes effets qu'il avait montrés, dans la séance précédente, sur des courants dont les conducteurs étaient pliés en spirale »⁶⁴.

Cette expérience fondamentale est réalisée à l'aide de l'appareil (fig. 20), où le conducteur *AB* est fixe et le conducteur parallèle *CD* est mobile autour de l'axe *EF*. La mobilité du circuit *ECDF* est accrue par la présence du contrepoids *H*.

A.C.P., t. 15, p. 224, pl. 1, fig. 1.



AB = conducteur fixe
CD = conducteur mobile
autour de l'axe *EF*.

Fig.20

Avec le même appareil, Ampère montre ensuite que le conducteur *CD* est attiré ou repoussé par un aimant perpendiculaire suivant le sens des courants dans l'aimant⁶⁵.

Ce sera désormais une pratique constante chez lui de faire correspondre à toute expérience entre courants l'expérience équivalente où l'un des courants (ou les deux) est remplacé par un aimant.

a) *Opposition électrostatique-électrodynamique*⁶⁶.

Ayant ainsi en trois séances suffisamment démontré l'analogie de comportement entre les aimants et les courants, Ampère revient sur le cas qui devient fondamental pour sa théorie, celui de l'action entre courants.

⁶⁴ *Annales des Mines*, t. v, 1820, p. 542. Confirmation de ce fait est donnée par Ampère dans le *Précis de la théorie des phénomènes électrodynamiques* (1824) : « Les expériences qui mettent en évidence l'action mutuelle de deux courants rectilignes dans ces deux cas (courants parallèles ou formant un angle quelconque) furent communiqués à l'Académie dans la séance du 9 octobre 1820 » p. 56.

⁶⁵ *A.G.S.P.*, p. 243.

⁶⁶ C'est Ampère lui-même qui invente les deux mots pour souligner l'opposition entre les deux types d'action. (« Exposé sommaire des découvertes... », dans *J. Pys.*, t. 94, 1822, p. 62 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 239).

Il lui faut d'abord nettement démarquer cette action des actions électrostatiques. En effet à l'Académie nouveau phénomène n'est pas reçu en tant que tel. Arago rapporte qu'« on voulut d'abord ne voir dans les attractions et répulsions des courants qu'une modification à peine sensible des attractions et répulsions électriques ordinaires, connues depuis le temps de Dufay »⁶⁷.

Une première différence, souligne Ampère, est que ce sont les conducteurs parcourus par des courants *de même sens* qui s'attirent alors que dans les actions électriques ordinaires ce sont les corps *de charges contraires* qui s'attirent. Ce fait ne soulève d'ailleurs pas de problème pour Ampère car il ne cherche pas à expliquer l'attraction entre courants par la force de Coulomb s'exerçant entre les charges mobiles dans les conducteurs.

Une deuxième différence réside dans le fait que l'attraction subsiste après le contact dans le cas des conducteurs alors qu'elle est remplacée par une répulsion dans le cas de corps de charges opposées.

Pour souligner encore l'opposition entre les deux séries de phénomènes, Ampère crut trouver une différence supplémentaire dans le fait que l'attraction entre courants a lieu aussi bien dans le vide que dans l'air, contrairement aux attractions entre corps chargés. On pensait en effet à l'époque que le vide était conducteur contrairement à l'air isolant⁶⁸.

Pour justifier cette hypothèse, il eût fallu faire agir des circuits sous la cloche à vide !

En fait l'affirmation d'Ampère provient d'un rapprochement avec les attractions entre aimants : l'attraction persiste aussi après le contact et cela « lui fait penser que le contact des conducteurs n'empêchant point leur action mutuelle, cette action doit comme celle de deux aimants l'un sur l'autre, avoir lieu dans le vide (...). C'est ce qu'il se propose de vérifier dès qu'il aura pu se procurer un appareil propre à cette expérience. Son succès établira une nouvelle différence entre ces attractions et répulsions et celles des corps simplement électrisés »⁶⁹.

Mais dans la rédaction finale du mémoire, il n'est plus question d'expérience et la transmission des actions électromagnétiques dans le vide est donnée sans référence à l'observation de départ relative aux aimants. Ampère avait sans doute senti le caractère très approximatif de son raisonnement mais ne voulait pas renoncer à un argument supplémentaire pour faire taire les objections à sa théorie.

Dans sa défense de la théorie électrique du magnétisme, Ampère est aidé à l'Académie par Arago. Ce dernier rapporte dans sa Notice sur Ampère :

« Une autre classe d'objectionneurs embarrassa plus sérieusement notre confrère (...).

Deux corps qui, séparément, ont la propriété d'agir sur un troisième, ne sauraient manquer d'agir l'un sur l'autre. Les fils conjonctifs, d'après la découverte d'Ørsted, agissent sur l'aiguille aimantée ; donc deux fils conjonctifs doivent s'influencer réciproquement; donc les mouvements d'attraction ou de répulsion qu'ils éprouvent quand on les met en présence, sont des déductions, des conséquences nécessaires de l'expérience du physicien danois (...). Ampère répondait en posant à ses adversaires le défi de déduire des expériences d'Ørsted, d'une manière un tant soit peu plausible, *le sens* de l'action mutuelle de deux courants électriques ; mais quoiqu'il mît beaucoup de vivacité dans sa demande, personne ne s'avoua vaincu.

Le moyen infallible de réduire au silence cette opposition passionnée, (...) était de citer un exemple où deux corps qui, séparément, agiraient sur un troisième, n'exerceraient néanmoins aucune action l'un sur l'autre »⁷⁰.

⁶⁷ ARAGO, *Œuvres complètes*, t. II, 1854, p. 58. +

⁶⁸ La facilité d'obtention de décharges électriques dans le vide (en fait dans l'air raréfié) explique que pour Ampère comme pour Biot, « le vide est bon conducteur ». Le caractère isolant de l'air est expliqué par la pression que ses molécules exercent sur les charges à la surface des conducteurs (Voir J.B. BIOT, *Précis élémentaire de Physique expérimentale*, 1817, t. II, p. 408, et AMPÈRE, « Sur le mode de transmission des courants électriques et la théorie électro-chimique », annexe II, p. 176).

⁶⁹ A.G.S.P., p. 245.

⁷⁰ ARAGO, *Œuvres complètes*, t. II, 1854, p. 58-59.

C'est Arago lui-même qui trouva l'exemple de deux clefs de fer qui attirent chacune une boussole mais sont cependant sans action l'une sur l'autre.

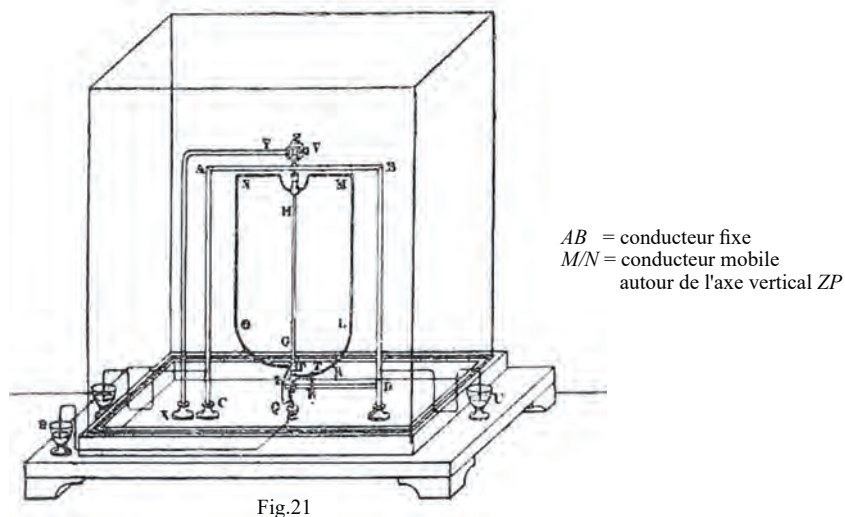
Cependant le refus de la théorie d'Ampère par une partie de l'Académie au nom de celle de Coulomb persistera jusqu'à la découverte des rotations continues par Faraday à l'automne 1821.

b) Un échec expérimental: rotation d'un courant

La foi dans le succès de l'expérience déjà affirmée au sujet des attractions électrodynamiques dans le vide est encore plus manifeste dans la troisième expérience qu'Ampère montre à ses pairs, ou plutôt dans l'appareil désespérément immobile que ceux-ci ont sous les yeux. Le 25 septembre il avait affirmé que deux courants mobiles autour de leur perpendiculaire commune (passant par leurs milieux) tendent à tourner pour se mettre parallèles et de même sens. Mais l'expérience est délicate à réaliser puisqu'il faut obtenir un conducteur mobile susceptible de prendre un mouvement de rotation (au lieu de translation comme dans l'appareil fig. 20) tout en restant relié aux pôles de la pile.

Et ce 9 octobre, il reconnaît que « M. Ampère n'a pu faire cette expérience par le défaut de mobilité des appareils qu'il avait fait construire pour cela, et dont un avait déjà été mis sous les yeux de l'Académie : il se propose d'en faire construire un nouveau... » ⁷¹

C'est sans doute pour ce nouvel appareil qu'Ampère imagine une amélioration technique importante : remplacer les contacts entre partie fixe et partie mobile par des godets de mercure dans lesquels tournent des pointes d'acier. L'expérience réussit peu après avec l'instrument représenté fig. 21.



A.C.P., t. 15, pl. I, fig. 2.

En fait dans cette expérience les actions ne se réduisent pas à celle entre le conducteur fixe AB et conducteur mobile MN. Tous les conducteurs verticaux interagissent également mais, heureusement pour Ampère, leurs actions sont de même sens que celle entre AB et MN. Ainsi si AB et MN sont parallèles et de sens contraires, le circuit mobile LMNOP tourne de 180°. Cette expérience justifiait a posteriori une des « Conclusions » du 25 septembre.

⁷¹ A.G.S.P., p. 246.

c) *La nature et l'origine du courant électrique*

Tout en expérimentant sur les courants mobiles, Ampère cherche à comprendre ce qu'est le courant électrique.

En fait il est le premier à avoir utilisé de façon systématique ce terme au lieu de « courant galvanique », ou « courant voltaïque » ⁷².

Déjà le 25 septembre, lors de son explication du magnétisme terrestre par des courants, il a évoqué la source de l'électricité dans la pile : « Volta a bien prouvé que l'électricité se développe au contact des métaux ; mais elle se développe aussi au contact des autres corps conducteurs » ⁷³.

Il s'oppose donc à Biot pour qui la force électromotrice n'existe qu'au contact entre les métaux.

Se démarquant ainsi de la théorie en vigueur, Ampère peut trouver une origine aux courants terrestres nécessaires à sa théorie : la répartition aléatoire des matériaux autour de la terre implique une force électromotrice résiduelle, « car sur une si grande longueur, il faudrait que l'arrangement fût fait à dessein pour que les actions dans un sens fussent exactement détruites par les actions de l'autre » ⁷⁴.

Voici pour la pile qui produit donc une accumulation d'électricités opposées sur chaque pôle ; mais qu'en est-il du conducteur ? Est-il seulement le lieu d'un transport d'électricité, fluide sans action sur la matière, ou a-t-il une structure microscopique jouant un rôle prépondérant dans le phénomène ?

La réponse est partiellement fournie par une expérience suggérée à Ampère par Laplace. Cette expérience, consistant à vérifier qu'un fil conducteur très long (une vingtaine de mètres) agit encore en son milieu sur l'aiguille, ayant réussi, « il avoue que cette expérience lui a d'abord paru appuyer l'opinion que *c'est un véritable transport d'électricité* qui a lieu le long du conducteur, et *non pas seulement une sorte de polarisation électrique de ses particules* » ⁷⁵. L'absence d'affaiblissement de l'effet magnétique à grande distance suggère en effet un phénomène de conduction.

L'expérience fournit en outre à Ampère une preuve supplémentaire du fait que la tension aux bornes de la pile n'est pour rien dans l'action sur une aiguille située à une si grande distance : l'effet est nécessairement dû au courant.

Elle est aussi à l'origine de la proposition d'Ampère de réaliser un télégraphe électrique composé d'autant de circuits que de lettres agissant sur des aiguilles à distance ⁷⁶.

La théorie du courant électrique, et plus précisément l'opposition entre ses effets et ceux qui sont dus aux phénomènes de tension est un point fondamental qu'il étudie en tête de son mémoire des *Annales de Chimie et de Physique*.

Les notions de tension et de courant électriques ne sont pas encore des concepts scientifiques mais seulement un classement en deux catégories disjointes d'un ensemble de phénomènes.

Les effets de tension sont ceux qui se manifestent lorsque les corps où a lieu l'action électromotrice sont séparés par un isolant. La force électromotrice, due au frottement ou au contact, sépare les fluides opposés jusqu'à ce que la force d'attraction qui tend à les réunir lui soit égale. Ampère ne prétend pas apporter du nouveau dans ce domaine.

Si au contraire on relie les deux corps, sièges de l'action électromotrice, par un conducteur, « ces tensions disparaissent ou du moins deviennent très petites » ⁷⁷. Ampère partage ici la théorie commune

⁷² Dans le texte des A.C.P. l'expression « courant voltaïque » est encore utilisée par Ampère mais un erratum demande de la remplacer par « courant électrique ».

⁷³ A.G.S.P., p. 247.

⁷⁴ A.C.P., p. 204.

⁷⁶ A.G.S.P., p. 247.

⁷⁴ A.C.P., p. 73.

⁷⁷ *Ibid.*, p. 63.

aux physiciens de l'époque. Cette erreur qui rend incompatible tension et courant se maintient jusqu'aux travaux d'Ohm.

Cependant, si les tensions disparaissent, l'action électromotrice continue à séparer les fluides électriques, « en sorte qu'il en résulte *un double courant, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative*, partant en sens opposés des points où l'action électromotrice a lieu, et allant se réunir dans la partie du circuit opposée à ces points. Les courants dont je parle vont en s'accroissant jusqu'à ce que l'inertie des fluides électriques et la résistance qu'ils éprouvent par l'imperfection même des meilleurs conducteurs fassent équilibre à la force électromotrice, après quoi ils continuent indéfiniment avec une vitesse constante tant que cette force conserve la même intensité » ⁷⁸.

Ce passage est révélateur de l'évolution en cours dans l'esprit d'Ampère vis-à-vis de la réalité physique du courant électrique. La première phrase reprend la théorie courante selon laquelle la pile se décharge lorsqu'on relie ses pôles par un conducteur, les fluides opposés se neutralisant en un point du circuit qui reste indéterminé. Le courant est alors une suite de décharges.

La deuxième phrase reprend la conclusion à laquelle il est arrivé par ses propres expériences c'est-à-dire la circulation continue des fluides électriques dans l'ensemble pile-conducteur. Cette conception, incompatible en fait avec la première, est celle qu'il retient avant de défendre en 1821 une théorie très voisine de celle d'Ørsted.

Par convention le sens du courant électrique est celui de l'électricité positive mais il y a en chaque point du circuit une double circulation des fluides opposés en sens contraires. Cette définition du sens conventionnel du courant pose d'ailleurs quelques problèmes autour de lui ⁷⁹.

Le mouvement perpétuel de l'électricité, par contre, n'étonne personne puisqu'il s'agit d'un fluide impondérable dont la quantité de mouvement est nulle quelle que soit sa vitesse. Il est cependant difficile à concilier avec l'inertie de ces mêmes fluides invoquée pour leur ralentissement dans les conducteurs.

L'action électromotrice qui sépare les fluides opposés à la jonction de deux métaux différents est également conçue d'une manière idéale. Ainsi la quantité d'électricité que « la pile met en mouvement pendant un même temps croît *indéfiniment* à mesure que l'on réunit les deux extrémités par un meilleur conducteur » ⁸⁰. Une quantité finie de matière serait donc un réservoir infini d'électricité.

La notion de circuit se précise simultanément avec celle de courant : nous avons vu qu'en septembre la pile et le conducteur sont considérés comme parcourus par des courants de sens contraire. C'est encore le référentiel du laboratoire qui sert de référence.

Le 9 octobre, après avoir rappelé que les décompositions chimiques étaient inversées dans la pile et dans le reste du circuit, il ajoute : « on peut comprendre ces deux cas (de décompositions) dans une même définition, en disant qu'on entend par courant électrique la direction suivant laquelle l'hydrogène et les bases des sels sont transportés par l'action de toute la pile, *en concevant celle-ci comme formant avec le conducteur un seul circuit (...)*. Au reste, tout ce que je vais dire sur ce sujet ne suppose aucunement qu'il y ait réellement un courant dans cette direction, et on peut ne considérer que comme une manière commode et usitée de la désigner, l'emploi que je fais ici de cette dénomination de courant électrique » ⁸¹.

Cette définition empiriste du courant qui permet à Ampère de laisser une chance à l'hypothèse de la polarisation des particules du conducteur pose en même temps, et pour la première fois, la définition du circuit fermé.

⁷⁸ *Ibid.*, p. 64.

⁷⁹ Voir en particulier la réponse d'Ampère son ami Bredin (le 16 mars 1821) qui n'a pas compris qu'il y a dans la terre une double circulation d'électricité comme dans les conducteurs. (*Correspondance*, t. II, p. 907).

⁸⁰ *A.C.P.*, p. 80.

⁸¹ *Ibid.*

d) *La première recherche de formule électrodynamique*

Dès ses premières recherches Ampère cherche à exprimer mathématiquement la force entre courants. Le mémoire des *Annales de Physique et de Chimie* mentionne seulement la méthode générale qu'il compte adopter : à partir de la force entre portions de courants infiniment petits, la force entre deux courants finis s'obtiendra par une double intégration et celle entre un aimant et un courant par une triple intégration (chaque tranche d'un aimant contient en effet une infinité de courants circulaires coaxiaux).

Cette méthode est donnée comme fondée sur la loi d'addition des éléments de courants qu'il a découverte expérimentalement fin octobre. La loi en question énonce simplement que l'action résultant de l'action de plusieurs éléments de courants est égale à celle résultant de l'élément formé par leur somme géométrique.

Mais en fait c'est dès le mois de septembre, donc avant la découverte de cette loi, qu'Ampère cherche une formule élémentaire dans le but d'obtenir par intégration l'action entre courants finis. Le principe d'addition était donc implicite dès le début. Cette recherche qui n'apparaît pas dans le mémoire est développée dans un manuscrit et évoquée dans l'Analyse déjà citée ⁸².

Le concept d'élément de courant paraît évident pour Ampère et il n'apportera pas de précision ultérieure au fait que c'est une portion de courant infiniment petite. C'est sans doute pour lui un concept parallèle à celui de masse ponctuelle en mécanique. La réalité physique de l'élément de courant n'intervient pas et comme élément de calcul il disparaît nécessairement après intégration. L'expérience qui fonde la validité de cette notion est la constance des effets du courant (vérifiée avec le « galvanomètre ») tout le long du circuit.

D'après les lois de la mécanique, si l'action entre deux corps ponctuels se réduit à une force, celle entre deux éléments longitudinaux se réduit à une force et un couple. C'est en faisant référence à l'expérience représentée fig. 21 qu'Ampère réduit l'action entre deux éléments de courant à une force seulement. La rotation du conducteur MN s'explique, affirme-t-il, uniquement par les forces d'attraction entre courants de même sens et « il suit que dans l'action mutuelle de deux courants électriques, l'action directrice et l'action attractive ou répulsive dépendent d'un même principe, et ne sont que des effets différents d'une seule et même action (action attractive) » ⁸³.

Cette hypothèse qui est donnée comme telle dans l'ouvrage de 1826 parfait le parallélisme entre les éléments de courants et les corpuscules newtoniens de matière ou de fluides. L'interaction se réduit à une force centrale.

L'intensité de cette force dépend non seulement de la distance mais aussi, et ce sera là une des critiques contre sa formule, des angles α , β , γ , qui déterminent les positions relatives des éléments de courants (fig. 22). Dans le cas le plus simple, celui de l'expérience précédente, où les courants restent perpendiculaires à la droite qui joint leurs milieux, l'attraction est maximale lorsque les courants sont parallèles et de même sens, diminue lorsque l'angle qu'ils forment diminue, est nulle lorsqu'ils sont perpendiculaires et se transforme ensuite en une répulsion qui est maximale lorsqu'ils sont parallèles et de sens contraire.

C'est de cette expérience purement qualitative entre courants finis qu'Ampère déduit le premier facteur angulaire de la force élémentaire :

« La répulsion devant être considérée comme une attraction négative, on voit par cette expérience que l'attraction diminue avec le cosinus de l'angle des deux courants, devient nulle ensuite et change de signe avec lui. Elle doit donc (...) être une fonction de degré impaire du cosinus de cet angle (...). Au

⁸² Arch. Ac. Sc., carton ,VIII chem. 158. Ce texte a été publié par nous-même : « Sur les premières recherches de formule électrodynamique par Ampère », dans *Revue d'histoire des sciences*, 1978, xxxi, p. 64-65. Ampère en donne une rapide analyse dans les *A.G.S.P.*, p. 247-248 ; dans les *A.C.P.* II annonce qu'il a pu lier sa formule « dans un des paragraphes suivants », mais il y a ensuite renoncé.

⁸³ *A.C.P.*, p. 74.

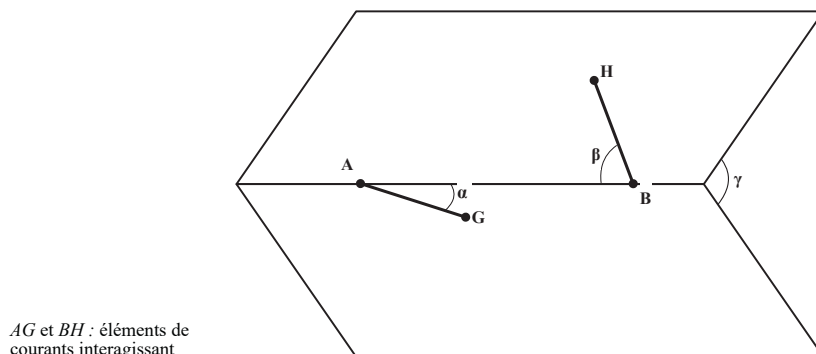


Fig.22

reste cette fonction du cosinus de l'angle de la direction des deux courants électriques ne peut avoir une forme simple que quand on considère des portions infiniment petites de ces courants. Il est probable qu'elle se réduit alors à la première puissance de ce cosinus, et c'est du moins la première supposition qu'il convient d'essayer dans la comparaison d'une hypothèse sur la loi des attractions et répulsions avec les résultats de l'expérience. Il faut y joindre le décroissement des attractions et répulsions à mesure que la distance augmente, dans le rapport inverse du carré de cette distance, conformément à ce qu'on observe pour tous les genres d'actions plus ou moins analogues à celui-là » ⁸⁴.

Il ajoute encore que si les courants ne sont plus perpendiculaires à la droite qui joint leurs milieux, il faut remplacer l'angle entre les deux courants par celui formé par les deux plans passant par chaque élément et cette droite. Et il conclut :

« C'est sur ces considérations générales que j'avais construit une expression de l'attraction de deux courants infiniment petits, qui n'était à la vérité qu'une hypothèse, mais la plus simple qu'on put adopter, et celle par conséquent qu'on devait d'abord essayer » ⁸⁵.

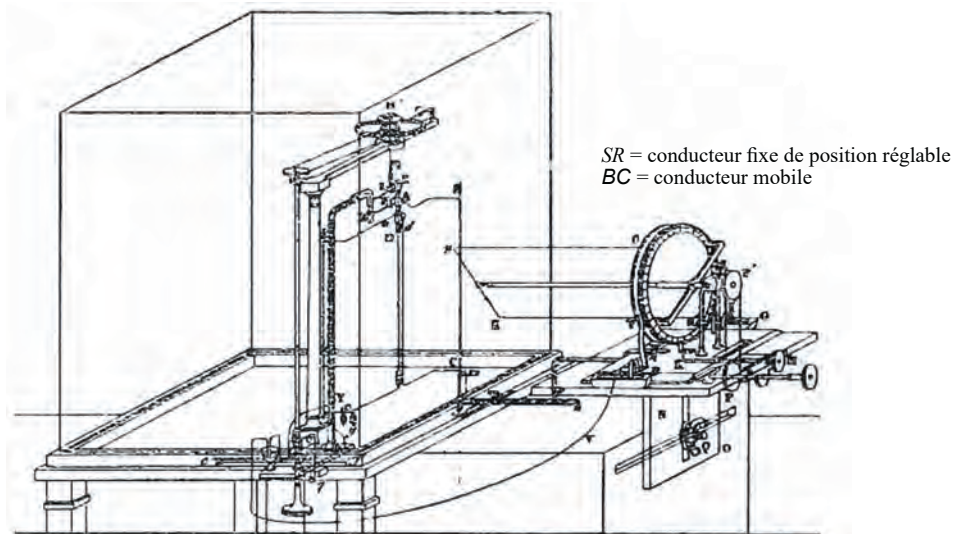
Les autres facteurs angulaires de la formule ne sont pas explicités par Ampère dans ce manuscrit mais on peut penser que le raisonnement a été identique au précédent. Si deux éléments sont parallèles et de même sens et que l'un des deux tourne autour de son centre dans leur plan, l'attraction diminue, devient nulle lorsqu'ils sont perpendiculaires et se transforme en répulsion maximale lorsqu'ils sont parallèles et de sens contraires. Si α est l'angle entre l'élément tournant et la droite qui joint les milieux des éléments, la fonction angulaire la plus simple correspondant à cette variation est $\sin \alpha$. Le deuxième élément fournit le facteur symétrique $\sin \beta$ et la force élémentaire est donc proportionnelle à :

$$\frac{\cos \gamma \sin \alpha \sin \beta}{r^2}$$

C'est à partir de cette formule qu'Ampère cherche à calculer l'action entre courants finis et pour vérifier ces calculs qu'il fait construire deux appareils, l'un version simplifiée de celui de la fig. 23 montré à Biot et Gay-Lussac dès le 17 octobre, l'autre destiné à étudier la force entre deux hélices (fig. 25). En fait le premier instrument qui fait imaginer de complexes mesures ne fut apparemment jamais utilisé. La faiblesse des fondements sur lesquels repose cette première formule est évidente : du point de vue mathématique il prend pour acquise la séparation des variables en fonctions trigonométriques élémentaires

⁸⁴ Arch. Ac. Sc., VIII, 158 et *Revue d'histoire des sciences*, 1978, xxxi, p. 64.

⁸⁵ *Ibid.*, p. 65.



A.C.P., t. 15, p. 353, pl. 3, fig. 1

Fig.23

et du point de vue expérimental, il étend aux éléments infinitésimaux des résultats relatifs aux courants finis. C'est sans doute pourquoi cette formule ne fut pas publiée. Cependant le 9 octobre il annonce déjà les facteurs $\cos \gamma$ et $\frac{1}{r^2}$ bien que le rôle des « considérations générales » ait été plus important que les « mesures précises » dans leur découverte.

Sa voie semble désormais de vérifier par des mesures absolues de forces entre courants finis, en fonction des angles et des distances, l'hypothèse faite sur la formule élémentaire. Le procédé présentait de grandes difficultés mais Ampère fut arrêté dans cette démarche non par des problèmes expérimentaux mais par la découverte d'un nouveau procédé d'obtention de la formule élémentaire.

3. Troisième mémoire : 16 octobre 1820. Aimantation par le courant

Ampère ayant appris d'Arago sa découverte de l'aimantation d'aiguilles d'acier placées perpendiculairement au fil conducteur, il suggère que l'aimantation sera plus intense si l'aiguille est placée dans une hélice le long de son axe. L'expérience réalisée en commun vérifia cette hypothèse⁸⁶.

L'intérêt théorique du procédé d'Ampère par rapport à celui d'Arago est de fournir un modèle explicatif simple de l'aimantation : « le courant dans chaque spire en entraîne un semblable et dirigé dans le même sens sur la surface de l'acier, et par suite d'autres dans son intérieur. C'est pour la même raison que l'aimantation s'étend au-delà de l'hélice quand (le fil d'acier) est plus long qu'elle »⁸⁷.

Cette première hypothèse selon laquelle les courants auxquels les aimants doivent leurs propriétés sont créés par l'influence de courants voisins n'est pas reprise dans son mémoire. Peut-être hésitait-il

⁸⁶ « Analyse des travaux de l'Académie Royale des Sciences pendant l'année 1820 », dans *M.A.R.S.*, 1818-1820, t. V p. 149.

⁸⁷ *A.G.S.P.*, p.250.

déjà avec la deuxième hypothèse qu'il développera ultérieurement selon laquelle ces courants préexistent dans l'acier et sont seulement orientés lors de l'aimantation.

Dans un manuscrit datant sans doute de cette période, Ampère décrit une expérience selon laquelle l'attraction entre deux hélices est renforcée lorsqu'on place à l'intérieur de chacune d'elle un gros fil d'acier ⁸⁸. On reconnaît le principe de l'électro-aimant à la différence près que l'acier remplace le fer doux.

En effet l'aimantation permanente, fondamentale pour la fabrication des aiguilles aimantées, était le but recherché aussi bien par Ampère que par Arago dans ces expériences.

L'aimantation temporaire du fer doux ne présentait pas pour eux d'intérêt et l'électro-aimant ne fut réalisé pour la première fois qu'en 1826 par Sturgeon ⁸⁹.

4. Quatrième mémoire : 30 octobre 1820. Action magnétique de la terre

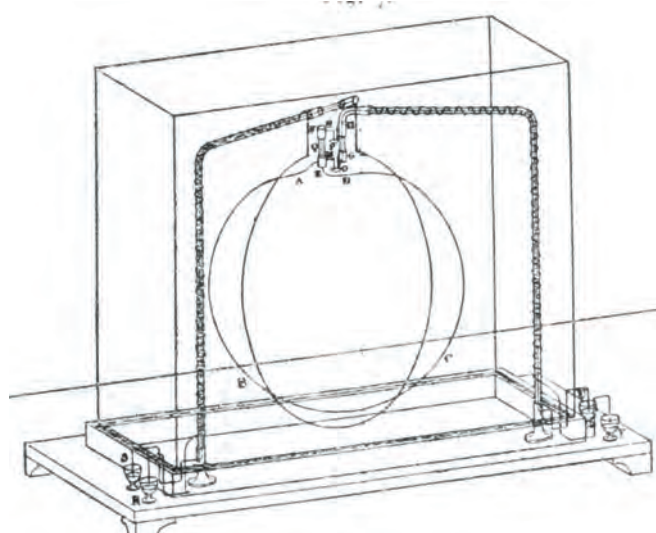
Nous avons vu que pendant la première quinzaine d'octobre, Ampère a fait construire deux appareils destinés à vérifier ses calculs relatifs aux forces entre courants finis et entre aimants.

Si les mesures prévues ne furent pas effectuées, dit-il dans le manuscrit étudié au § 2-4, c'est que les expériences « lui firent découvrir deux faits nouveaux qui en compliquaient les résultats » et lui firent suspendre ses tentatives de vérifications numériques ⁹⁰.

Le premier de ces faits nouveaux est l'action magnétique de la terre sur le circuit mobile.

Le deuxième, l'attraction entre deux hélices parcourues par des courants de même sens, le mènera à expliciter (le 6 novembre) la loi d'addition géométrique des éléments de courants.

Comment se manifestait précisément le premier phénomène ? Le circuit fixe étant ouvert (fig. 23), le circuit mobile s'orientait lorsqu'il était seul parcouru par un courant et le sens d'orientation changeait avec celui du courant.



Circuit mobile autour d'un axe vertical

A.C.P., t. 15, p. 353, pl. 1, fig. 2

Fig.24

⁸⁸ Arch. Ac. Sc., x, 205.

⁸⁹ « L'invention de l'électro-aimant », dans *Revue Générale des Sciences*, t. 37, 1926.

⁹⁰ Arch. Ac. Sc., vii, 158.

Encore une fois l'expérience fait découvrir un nouvel aspect des phénomènes à Ampère : préoccupé de mesures entre courants, c'est l'action du magnétisme terrestre, vainement cherchée quelques semaines plus tôt, qui s'impose à lui.

Dans ce mémoire il décrit les deux circuits mobiles autour d'un axe vertical (fig. 24) ou horizontal destinés à montrer les deux composantes de la force magnétique terrestre.

Ce même jour il lut un texte, resté inédit, destiné à prouver que le magnétisme terrestre est dû aux régions équatoriales et non aux pôles ou au centre de la terre. Même si l'expérience qu'il donne à l'appui de cette thèse ne se soutient pas, elle témoigne cependant de son souci de préciser les lois de la déclinaison et de l'inclinaison à la surface de la terre. Le géomagnétisme faisait en effet alors partie intégrante de la théorie magnétique.

L'impossibilité de préciser la structure des courants terrestres empêcha cependant Ampère de poursuivre ses recherches dans cette voie ⁹¹

II. L'ÉTABLISSEMENT DE LA LOI D'ACTION ENTRE DEUX ÉLÉMENTS DE COURANTS

Ayant réduit les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques grâce à son modèle électrique de l'aimant, Ampère a éliminé les fluides magnétiques et prévu deux nouveaux phénomènes : l'action entre deux courants et celle de la terre sur un courant.

La voie sur laquelle il s'engage alors est de vérifier par des mesures de forces entre courants la validité de la formule élémentaire qu'il a obtenu par un large recours à l'intuition. Mais c'est encore une nouvelle découverte expérimentale qui va l'amener à changer complètement de stratégie et à abandonner définitivement ses tentatives de mesures directes.

1. Cinquième mémoire : 6 novembre 1820

a) Distinction entre deux types d'hélices

En même temps qu'il faisait construire l'appareil (fig. 23) destiné à mesurer la force s'exerçant entre deux courants rectilignes en fonction de leur distance et des angles α , β , γ , Ampère en avait fait réaliser un autre destiné à vérifier ses calculs sur l'action entre deux hélices (fig. 25).

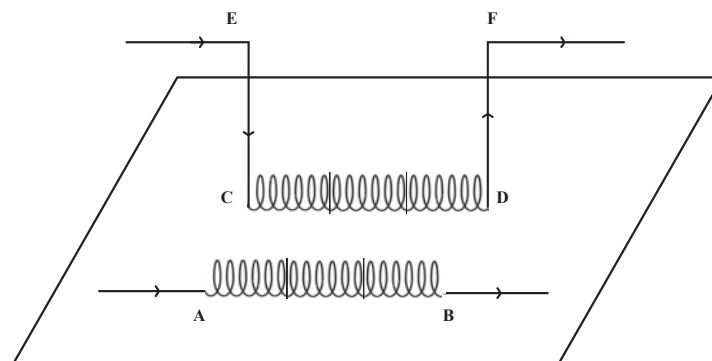


Fig.25

⁹¹ Sur l'étude du magnétisme terrestre voir J. CAWOOD, « Terrestrial magnetism and the development of international collaboration in the early nineteenth century », dans *Anal. of Science*, 34, 1977, p. 551-587.

C'est avec ce dernier appareil qu'il découvrit le deuxième fait nouveau.

D'après sa théorie, Ampère s'attendait en effet à ce que les deux hélices parallèles se comportent comme des aimants parallèles, c'est-à-dire se repoussent. Or reconnaît-il : ces hélices « présentaient en outre les effets d'un conducteur rectiligne égal à l'axe de ces hélices et (...) c'étaient même les effets dans le sens longitudinal qui étaient les plus sensibles, phénomène qui m'étonnait beaucoup avant que j'en eusse découvert la cause »⁹². Ainsi les hélices s'attiraient comme deux courants parallèles et de même sens.

Par contre l'hélice mobile autour d'un axe vertical (fig. 19) dont le conducteur revient le long de l'axe pour assurer sa libre rotation, ne présentait pas cet effet paradoxal et se comportait exactement comme un aimant.

La différence de construction entre des deux sortes d'hélices était simplement due à la nécessité de choisir des modes de suspension différents selon le mouvement prévu : translation dans le premier cas, rotation dans le second. C'est de la manipulation de ces deux types d'hélices qu'Ampère déduit sa loi théorique sur l'addition des éléments de courants infiniment petits.

Ainsi dans une hélice, « l'action produite par le courant de chaque spire se compose de deux autres, dont l'une serait produite par un courant parallèle à l'axe de l'hélice, représenté en intensité par la hauteur de cette spire, et l'autre par un courant circulaire (...) ; et comme la somme de toutes les hauteurs de toutes les spires, prises parallèlement à l'axe de l'hélice, est nécessairement égale à cet axe, il s'ensuit qu'outre l'action produite par les courants circulaires transversaux, que j'ai comparée à celle de l'aimant, l'hélice produit en même temps la même action qu'un courant d'égale intensité qui aurait lieu dans son axe »⁹³. Et même, ses hélices ayant un rayon petit devant leur longueur, cet effet longitudinal était prépondérant, ce qui explique qu'elles se comportaient comme des conducteurs parallèles et non comme des aimants.

Lorsqu'il annonce, le 6 novembre, ce que nous appellerions aujourd'hui le principe d'addition vectorielle des éléments de courants, Ampère n'a pas d'autre preuve expérimentale que cette différence de comportement entre ses deux sortes d'hélices.

Cependant il prend comme nouvelle base de sa recherche de formule ce principe qu'« il n'a encore vérifié qu'à l'égard des courants dans des fils métalliques pliés en hélice, mais qu'(il) croit vrai en général, à l'égard des portions infiniment petites de courants électriques dont on doit concevoir tout courant d'une grandeur finie comme composé, lorsqu'on veut en calculer les effets soit, qu'il ait lieu suivant une ligne droite ou une courbe »⁹⁴.

Ainsi se trouve justifié à posteriori son projet de calculer l'action entre des courants finis par l'intégration de la force entre deux éléments infiniment petits.

L'analyse mathématique peut désormais s'appliquer et Ampère abandonne momentanément ses instruments.

b) Justification de la loi d'addition par la considération de l'éther

D'après ses notes manuscrites, ainsi que d'après certains textes ultérieurs, il semble que ce soit essentiellement la considération de l'éther qui a confirmé intérieurement Ampère dans la valeur de cette loi.

Ainsi par exemple on peut lire sur un manuscrit inachevé : « Ma manière de concevoir le courant : *décharges successives poussant l'éther*. Young a prouvé, Fresnel a complété. L'éther prend la vitesse résultante de celle que deux ou plusieurs décharges lui donneraient séparément (...). Après avoir conclu d'une

⁹² *A.C.P.*, p. 176.

⁹³ *Ibid.*, p. 175.

⁹⁴ *Ibid.*, p. 174.

expérience faite avec M. Arago, *la loi des projections et m'y être attaché par la considération des mouvements de l'éther...* »⁹⁵.

Cependant Ampère ne fait aucune allusion au rôle de l'éther à cette époque si ce n'est dans l'Analyse déjà citée qui eut une très faible diffusion : « Si les attractions et répulsions des courants électriques sont produites par un mouvement quelconque excité dans l'éther par la série de décharges électriques dont on considère généralement ces courants comme composés, la loi qu'il a déduite de l'expérience devient une suite nécessaire des lois connues du mouvement puisque l'impulsion donnée dans la direction où ces décharges ont lieu, est la résultante des décharges pareilles qui auraient lieu dans trois projections rectangulaires de cette direction »⁹⁶.

Le problème de la transmission des actions électrodynamiques est donc déjà posé. Le rôle de l'éther restera toujours fondamental dans l'esprit d'Ampère, même si les modalités de son action évoluent avec la théorie électrodynamique.

2. Sixième mémoire : 13 novembre 1820. Essais de création de courant par le magnétisme

Le mémoire qu'Ampère lut ce jour-là, « Effets électrochimiques d'une hélice en fer soumise seulement à l'action du magnétisme terrestre » ne fut pas publié⁹⁷, car il se rétracta ultérieurement au sujet de ces expériences.

Pour expliquer l'aimantation Ampère a supposé qu'un courant électrique peut en créer d'autres par influence dans le fer ou l'acier. Fresnel, qui partage toutes ses recherches, tente de mettre en évidence le phénomène inverse : la création dans une hélice d'un courant par l'influence d'un aimant placé le long de son axe. Les extrémités de l'hélice plongées dans l'eau acidulée créèrent un dégagement gazeux.

Ampère tente alors la même expérience en remplaçant la force magnétique de l'aimant par celle de la terre : il place l'hélice parallèlement à la direction de l'aiguille d'inclinaison et observe également un dégagement gazeux. Cependant ayant repris l'expérience, celle-ci est beaucoup moins concluante.

Il abandonne alors ces tentatives de création de courants par induction qui ne pouvaient qu'échouer tant que l'hélice restait fixe par rapport à l'aimant ou à la terre.

En avril 1833, soit deux ans après la découverte de l'induction par Faraday, il décrit à ce dernier une tentative de création de courant instantané qu'il aurait faite en 1820, et qui n'est pas mentionnée dans les textes de cette période :

« J'avais placé un barreau aimanté dans une hélice dont les deux extrémités réunies formaient une anse que j'approchais parallèlement à la ligne des pôles d'une petite aiguille placée assez loin du barreau pour que les petits déplacements de ce barreau n'eussent pas d'action sensible sur l'aiguille ; mais il était bien difficile qu'en approchant et en éloignant alternativement l'anse du fil conducteur de l'aiguille, je ne secouasse pas plus ou moins l'hélice de manière à déranger parfois la situation relative de cette hélice et de l'aimant, (et) à les faire, sans m'en apercevoir, glisser un peu l'un sur l'autre ; ce qui, d'après vos belles recherches, devait aussitôt produire un courant dans le fil faisant dévier l'aiguille aimantée pendant le peu de temps qu'il durait. Je la voyais ainsi un peu agitée. D'autre fois, l'hélice et l'aimant ne changeant pas de position respective, je n'obtenais absolument aucun effet et j'abandonnais tout à fait ces effets quand je sus que ce que Fresnel avait d'abord observé ne se soutenait pas ...).

⁹⁵ Arch. Ac. Sc., x, 205 bis.

⁹⁶ AGSP, p. 258.

⁹⁷ Il est résumé dans les « Notes de M. Ampère sur les lectures qu'il a faites à l'Académie des Sciences », dans *J. Phys.*, t. 91, 1820, p. 169.

M'étant ainsi rétracté au sujet de ces expériences faites en 1820 et dont celles de Fresnel m'avaient suggéré l'idée, je ne puis plus avoir aucune sorte d'intérêt à les regarder aujourd'hui comme exactes. Cependant, je vous avouerai, mon cher confrère que, depuis les découvertes par lesquelles vous avez répandu tant de lumière sur cette branche de la physique, je ne puis guère douter que l'action que j'avais observée ne fût véritable »⁹⁸.

3. Septième mémoire : 4 et 11 décembre 1820

4 décembre : la formule électrodynamique

Les recherches d'Ampère prennent une nouvelle orientation en décembre 1820 : il se consacre entièrement à la loi mathématique de l'action entre éléments de courants et abandonne l'étude expérimentale des interactions entre la terre, les courants et les aimants.

Nous avons vu que le 9 octobre, Ampère a donné quelques aperçus sur cette formule : décroissance en $1/r^2$, proportionnalité au facteur $\cos \gamma$ mais qu'il a gardé par devers lui les deux autres facteurs angulaires qu'il n'avait pu obtenir que par le seul recours à l'intuition. Mais depuis cette date, l'explicitation de la loi d'addition des éléments de courants, lue le 6 novembre, permet à Ampère de fonder sa nouvelle démarche sur la géométrie.

a) La force élémentaire est une force centrale

La première hypothèse qu'il fait est que l'explication de toutes les actions entre aimants et courants peut se faire « en admettant uniquement, entre les portions infiniment petites de ce qu'il a nommé courant électrique, *des forces dirigées suivant la ligne qui joint leurs milieux*, ne pensant pas qu'on puisse admettre entre elles, de quelque nature qu'elles soient, aucune sorte d'action dans une autre direction »⁹⁹.

Nous avons vu l'origine expérimentale de cette hypothèse restrictive : pas de couple, pas de composante de la force dans une autre direction. Il a souvent été reproché à Ampère de faire cette hypothèse : P. Duhem, H. Poincaré et plus récemment R.A.R. Tricker ont par exemple fait cette critique¹⁰⁰.

Le refus de considérer un couple entre éléments infinitésimaux est pour Ampère un choix a priori qui, s'il est justifié par les conséquences expérimentales, possède le gain théorique de la simplicité.

En outre s'il est clair aujourd'hui que toute formule de force entre éléments de courants ne peut se vérifier qu'après une double intégration, et que donc une infinité de formules différentielles sont possibles, pour Ampère, qui venait d'inventer les portions de courants mobiles, la force entre deux éléments de courants (même infiniment petits) avait un caractère objectif.

Elle devait donc, en particulier, satisfaire au principe de l'action et de la réaction. C'est ainsi qu'il sous-entend que la force exercée par le premier élément de courant sur le deuxième est égale et opposée à celle exercée réciproquement par le deuxième sur le premier, alors qu'il n'en est pas de même dans la formulation actuelle.

⁹⁸ *Correspondance*, t. II, p. 767.

⁹⁹ *Coll. Mem.*, t. II, p. 128. Le mémoire lu le 4 décembre (Arch., carton VIII, chem. 162) a été publié dans la *Collection de Mémoires*, t. II, p. 128-135. Ampère en a donné des analyses dans le *Journal de Physique*, t. 91, 1820, p. 226-230 et dans les *Annales des Mines*, t. V, 1820, p. 546-553.

¹⁰⁰ P. DUHEM, *La théorie physique, son objet et sa structure*, 1906, p. 323. - H. POINCARÉ, « A propos des expériences de M. Crémieu », dans *Revue générale des sciences*, t. 12, 1901 : « Ampère suppose que l'action mutuelle de deux éléments se réduit à une force dirigée suivant la droite qui les joint et que l'action de deux courants fermés est la résultante des actions mutuelles de leurs divers éléments. (...) Ce qui est remarquable, c'est qu'Ampère fait ces deux hypothèses sans s'en apercevoir » (p. 996). Nous avons vu au contraire que c'était un choix explicite pour la première hypothèse et un « principe déduit de l'expérience » pour la seconde. - R.A.R. TRICKER, *Early electrodynamics*, 1965 : « His assumption implies that current elements do not tend to rotate each other » (p. 45).

Ce point de l'égalité de l'action et de la réaction est si évident pour Ampère à ce stade de sa recherche qu'il n'éprouve pas encore le besoin de le préciser explicitement. Ce n'est que dans la *Théorie des phénomènes électro-dynamiques* qu'il insiste sur ce point pour souligner cet aspect newtonien de sa formule.

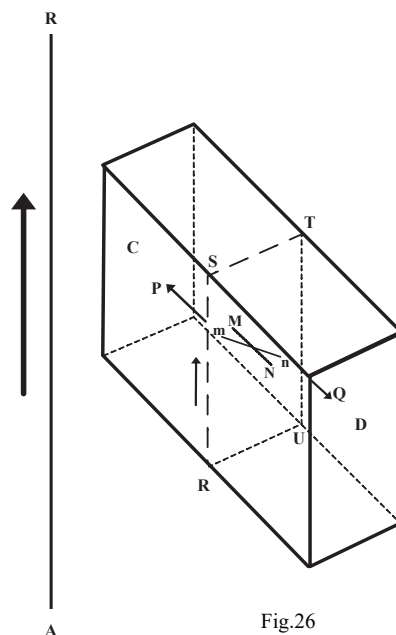
En effet, par ailleurs, cette formule était bien peu newtonienne.

Comme le souligne Arago, « (les géomètres) qui avaient fait le plus fréquent usage des théories newtoniennes ne devaient-ils pas être inquiets en voyant des lignes trigonométriques relatives aux inclinaisons relatives des éléments infiniment petits des courants électriques, dans l'expression générale des actions mutuelles de ces éléments ? »¹⁰¹.

b) Démonstration de la loi de Biot sur l'action d'un courant infini

Avec sa deuxième hypothèse, à savoir la décroissance en $1/r^2$, Ampère démontre le 4 décembre que l'action d'un fil infini sur un élément de courant parallèle est inversement proportionnelle à la distance de l'élément au fil.

Il lui est ensuite facile de montrer que l'attraction du fil infini sur un pôle magnétique est aussi inversement proportionnelle à la distance, ce qui est exactement le résultat expérimental annoncé par Biot le 30 octobre. Pour faciliter sa démonstration, Ampère choisit un aimant parallélépipédique (fig. 26), assimilé à des courants rectangulaires perpendiculaires à son axe.



Collection de mémoire, t. II, p. 131

Fig.26

Le fil AB attire RS qui est parallèle et de même sens, repousse TU et a une action nulle sur ST & RU « qui sont horizontales, car les attractions et les répulsions de toutes les petites portions des conducteurs se compensent nécessairement dans ces directions »¹⁰².

Ces deux forces sont équivalentes aux deux forces P et Q qui, selon Biot, s'exercent sur les molécules magnétiques *m* et *n*.

L'expérience ne permet donc pas de départager entre les deux théories, mais pour Ampère, « la théorie qui ramène tous les phénomènes de l'aimant à ceux qu'offre l'électricité (... à l'avantage sur l'autre) de

¹⁰¹ ARAGO, *Œuvres complètes*, t. II, 1854, p. 69.

¹⁰² *Coll. Mem.*, t.II p. 128.

ne pas faire agir le fil conducteur AB sur des particules magnétiques dont rien ne démontre l'existence et qui sont « *une supposition gratuite* »¹⁰³, argument qui pouvait bien évidemment lui être retourné tel quel à propos des courants dans les aimants !

c) *La loi d'addition et la nullité d'action entre éléments orthogonaux*

Le troisième principe utilisé par Ampère pour construire sa formule est la loi énoncée le 6 novembre, et qui consiste « en ce que si l'on considère une portion infiniment petite de courant électrique, et que l'on conçoive au même point de l'espace d'autres portions infiniment petites de courants électriques qui soient, par rapport à la première, en intensité et en direction, ce que les composantes d'une force sont en grandeur et en direction relativement à cette force, la réunion de ces portions de courants électriques, correspondantes aux forces composantes, exercera, dans tous les cas, précisément la même action que celle qui correspond à leur résultante »¹⁰⁴.

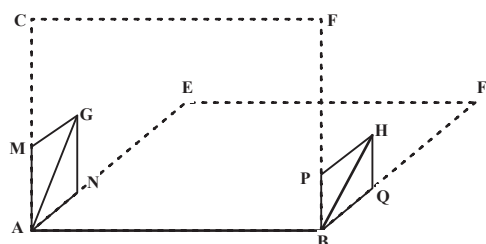
La force entre deux éléments est en outre proportionnelle à leurs intensités g et h , au sujet desquelles on peut lire dans le manuscrit : « g et h ne dépendent que de ce qu'il passe d'électricité en temps égaux, la quantité compensant la vitesse. C'est la quantité de mouvement pourvu que le passage soit complètement libre, c'est-à-dire le conducteur suffisamment gros »¹⁰⁵.

C'est ici la première définition mathématique de l'intensité en tant que débit d'électricité.

Dans le cas le plus simple où les deux éléments sont parallèles et où la ligne qui joint leurs milieux leur est perpendiculaire la force qui est maximale se réduit donc à $\frac{gh}{r^2}$

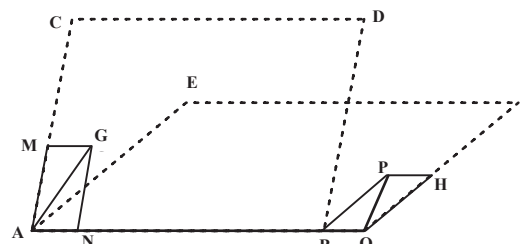
Dans le cas encore particulier où les deux éléments (AG et BH) sont perpendiculaires à la droite qui joint leurs milieux, Ampère les décompose suivant deux axes perpendiculaires (fig. 27)¹⁰⁶.

Action entre deux éléments de courants



Cas particulier où les éléments de courants AG et BH sont :perpendiculaires à la ligne qui les joints AB

Fig.27



Cas général :
 $\alpha = GAN$ $\beta = HBQ$ $\gamma = DBP$

Fig.28

Il obtient ainsi quatre éléments de courants qui interagissent deux à deux : la force d'attraction entre couples parallèles a l'expression précédente tandis que pour l'action entre les éléments orthogonaux Ampère fait l'hypothèse qu'elle est nulle.

103 *Ibid.*, p. 133.

104 *J. Phys.*, t. 91, 1820, p. 226.

105 *Arch. Ac. Sc.*, VIII, 162.

106 Ampère ne représente que les moitiés AG et BH des éléments de courants dont les milieux sont A et B.

Le mémoire ne donne pas de justification pour cette quatrième hypothèse, mais le brouillon des Archives de l'Académie est plus précis. Après avoir rappelé l'expérience où l'attraction se change en répulsion lorsque le courant mobile tourne d'un demi-tour (fig. 21), Ampère écrit : « cette action a dû être nulle dans une situation intermédiaire, et il me paraît naturel de penser que cette circonstance a lieu lorsque l'extrémité de dy que l'on considère a décrit la moitié de cette demi-circonférence, c'est-à-dire quand la direction de dy est arrivée *dans le plan élevé perpendiculairement sur le milieu de dx* » ¹⁰⁷.

Encore une fois nous voyons l'action entre des éléments infiniment petits « déduite » par analogie avec l'action sur des courants finis homothétiques, raisonnement a priori illégitime.

Ce problème de la nullité d'action entre éléments orthogonaux est un problème délicat, et Ampère le reprend en 1822 dans les *Notes* qu'il ajoute à l'*Exposé* qu'il fit à la séance publique de l'Académie du 8 avril 1822, avec un autre argument :

« L'action mutuelle de deux portions infiniment petites de fils conducteurs est nécessairement nulle toutes les fois qu'il n'y a, dans leur situation respective, aucune circonstance qui distingue l'un de l'autre les deux sens suivant lesquels une de ces deux petites portions peut être parcourue par le courant électrique ; car alors, en y renversant le sens de ce courant, l'action, si elle existait, devrait rester la même (...) tandis que d'après le fait général dont je viens de parler (le changement de l'attraction en répulsion lors du changement de sens d'un des courants), l'attraction se change au contraire, dans ce cas en répulsion et la répulsion en attraction » ¹⁰⁸.

Ainsi, si l'un des éléments est perpendiculaire en son milieu à un plan passant par l'autre, il n'y a « aucune différence entre les deux sens suivant lesquels le courant électrique peut le parcourir qui dépende de sa situation, relativement à celui qui est dans le plan ». Donc l'action est nulle. Cependant ce raisonnement par symétrie ne satisfait encore pas Ampère car dans la *Théorie des phénomènes électrodynamiques*, c'est encore un autre argument qui sera avancé !

Si nous revenons au cas particulier étudié (fig. 27) l'action se résume donc aux forces entre éléments parallèles, soit après calcul des projections, à $\frac{gh}{r^2} \cos \gamma$ en appelant toujours γ l'angle entre les deux éléments de courants.

Dans le cas le plus général (fig. 28) où les deux éléments (AG et BH) ne sont plus perpendiculaires à la ligne qui les joint, mais font des angles $\alpha = \text{GAN}$ et $\beta = \text{HBQ}$ avec elle, $\gamma = \text{CAE}$ est l'angle entre les deux plans passant respectivement par un élément et la ligne qui joint leurs milieux. La projection des éléments sur cette ligne d'une part, et sur les plans perpendiculaires à cette ligne d'autre part donne quatre éléments. Les interactions entre éléments orthogonaux étant nulles, il reste deux couples (AM, BP) et (AN, BQ).

L'action entre AM & BP est celle du cas particulier précédent, soit :

$$\frac{(g \sin \alpha)(h \sin \beta)}{r^2} \cos \gamma \quad \text{ou} \quad \frac{gh \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma}{r^2}$$

Les éléments colinéaires AN & BM ont-ils une action l'une sur l'autre ?

¹⁰⁷ Arch. Ac. Sc., VII, 162.

¹⁰⁸ *Recueil d'observations électrodynamiques*, 1822, p. 209.

Ampère répond dans son brouillon : « Je supposerai aussi que l'action attractive ou répulsive de deux portions de courant infiniment petites est nulle dans une autre circonstance, c'est *quand ils ont lieu dans une même ligne droite* ».

Cependant Ampère hésite encore à ce sujet et pour garder à sa formule toute sa généralité, il suppose que l'action entre ces éléments colinéaires est « une partie représentée par la fraction $\frac{n}{m}$ de celle que les mêmes petites portions de courants exerceraient dans la situation la plus favorable à leur action mutuelle, c'est-à-dire quand elles sont parallèles entre elles et perpendiculaires à la ligne qui en joint les milieux » ¹⁰⁹.

La force s'exerçant entre les éléments AN et BQ est donc :

$$\frac{n}{m} \frac{(g \cos \alpha) (h \cos \beta)}{r^2}$$

et la force totale entre AG et BN :

$$\frac{gh}{r^2} \left(\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \frac{n}{m} \cos \alpha \cos \beta \right)$$

« Mais M. Ampère pense, en attendant, qu'on peut, sans inconvénient, réduire cette formule à

$$\frac{gh \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma}{r^2}$$

C'est sous cette forme qu'il l'avait communiquée à plusieurs savants avant la lecture de son mémoire à l'Académie ».

Ampère retrouve ainsi la formule, obtenue en octobre par des raisonnements précaires, ce qui ne pouvait que confirmer sa confiance dans son premier résultat.

11 décembre

La lecture du mémoire se poursuit le 11 décembre par une analogie entre cette formule (simplifiée) et « celle qui exprime la quantité de chaleur rayonnante qu'une portion infiniment petite de surface reçoit d'une autre petite portion de surface ou qu'elle lui envoie » ¹¹⁰. Cette analogie conduit Ampère à énoncer des propriétés erronées pour les courants électriques, entre autre la nullité d'action d'un courant fermé infiniment petit.

En outre il présente quelques expériences destinées à confirmer la nullité du facteur $\frac{n}{m}$ expériences décrites seulement dans le manuscrit du mémoire.

Dans la première expérience, « il a mis (...) deux fils conducteurs dans la situation où $\cos \alpha \cos \beta$ est négatif et égal à $\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma$, c'est-à-dire dans celle où leurs directions forment un angle droit dans

¹⁰⁹ L'hésitation d'Ampère à affirmer la nullité d'action entre deux éléments colinéaires d'un même courant est due à l'expérience de Gay-Lussac et Thénard montrant que lors de la décharge électrique entre deux fils conducteurs reliés aux pôles d'une pile puissante, les deux fils sont fortement attirés. Après avoir attribué cette attraction au vide créé dans l'air par le passage de l'électricité il écrit dans un autre manuscrit : « C'est faute d'avoir trouvé cette explication (à) l'expérience de MM. Gay-Lussac et Thénard, que j'ai différé de 15 jours la publication de mon premier travail où je n'employais que le terme $\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma$, et qui m'a fait présenter avec doute que l'autre fût nul dans la séance du 4 décembre » (Arch. Ac. Sc., x, 189).

¹¹⁰ *Anne. Mines*, t. v, 1820, p. 552. Le manuscrit du mémoire se trouve aux Arch. Ac. Sc., viii, 163.

l'espace. Mais rien ne (lui) a indiqué que (l'action) eut une valeur sensible »¹¹¹ (fig. 29). En fait cette expérience prouverait plutôt que $\frac{n}{m}$ vaut 1 et non 0 puisque c'est la somme des deux termes de la formule qui est nulle et non le deuxième comme Ampère voudrait le montrer.

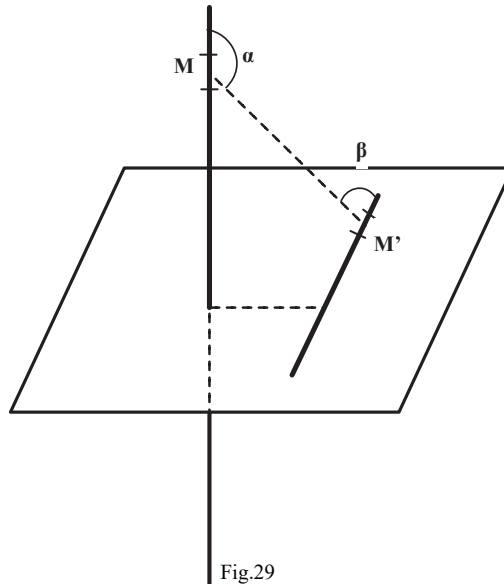


Fig.29

Deuxième argument expérimental : « Le peu d'attraction de deux aimants côte à côte prouve que le terme en $\cos \alpha \cos \beta$ est nul : il donnerait entre eux une forte attraction »¹¹². Ici le calcul des forces relatives aux courants parallèles d'une part et courants colinéaires d'autre part aurait été nécessaire pour justifier cet argument.

Enfin pour vérifier la proportionnalité au facteur $\cos \gamma$ de sa formule réduite, Ampère imagine de modifier l'expérience de Biot en inclinant d'un angle b sur l'horizontale l'aimant suspendu devant un fil infini. La force s'exerçant sur chaque élément de courant horizontal de l'aimant reste nulle tandis que celle s'exerçant sur les éléments verticaux est multipliée par $\cos b$. La force totale est donc proportionnelle à ce même facteur ainsi, ajoute Ampère, que la période des oscillations de l'aiguille. Or la force est proportionnelle, en réalité, à l'inverse du carré de la période. Pourtant on peut lire dans le manuscrit du mémoire lu :

« C'est ce que j'ai vérifié en les comptant à l'aide d'un chronomètre que M. Bréguet a eu la bonté de me prêter hier. J'ai regardé d'abord cette expérience comme une preuve démonstrative de l'exactitude de ma formule (... mais en fait c'est) une simple probabilité car dans l'hypothèse de Biot, on obtient le même résultat »¹¹³.

111 Arch. Ac. Sc., VII, 163. 1 Il est facile de montrer que pour deux éléments orthogonaux de milieux M et M' (fig. 29) où $\alpha = (\vec{ds}, \vec{MM'})$, $\vec{MM'}$ et $\gamma = (\vec{ds} \times \vec{MM'}, \vec{ds'} \times \vec{MM'})$, on a : $\cos \alpha \cdot \cos \beta = -\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma$.

112 Arch. Ac. Sc., x, 189.

113 Arch. Ac. Sc., VIII, 163.

Soulignons que c'est ici le seul moment dans l'œuvre d'Ampère où il se prête à une vérification numérique (ou du moins en affirme l'existence car il n'y a aucune feuille de mesures ...).

Aucune des trois expériences décrites ce jour-là devant les membres de l'Académie ne pouvaient donc être considérées comme des arguments très puissants en faveur de la nullité du facteur $\frac{n}{m}$. Elles témoignent du profond désir d'Ampère de retrouver sa formule du mois d'octobre, ainsi que de la hâte avec il doit rédiger ses mémoires.

4. Huitième mémoire : 26 décembre 1820, Expérience du « fil sinueux »

Ce mémoire a pour but de donner une preuve expérimentale de la loi d'addition des courants ; en effet souligne-t-il

: « Comme c'est de cette loi (...) qu'il a déduit l'expression analytique de l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de courants électriques, (...) on sent qu'il a dû chercher les moyens de la vérifier par des expériences directes et susceptibles de précision » ¹¹⁴.

Cependant lors de la lecture du mémoire l'expérience est encore une expérience théorique car Ampère y annonce :

« dès que cet instrument sera achevé, je ferai les expériences auquel il est destiné » ¹¹⁵.

L'expérience décrite à l'Académie consiste à mesurer successivement l'action d'un fil conducteur droit, puis celle d'un fil sinueux sur un petit aimant mobile rendu astatique. En effet en conséquence de la loi d'addition une portion de courant rectiligne peut être remplacée par une autre qui n'en diffère que par des déformations du premier ordre :

« Cet aimant est suspendu, comme l'aiguille de la balance de torsion, pour mesurer l'action qu'exerce sur lui chaque conducteur, et qu'on trouve toujours la même, soit que le conducteur soit rectiligne ou composé de petits arcs contournés de diverses manières » ¹¹⁶.

On peut penser que cette expérience a présenté d'extrêmes difficultés lorsque Ampère a tenté de la réaliser. En effet elle nécessite l'égalité rigoureuse du courant dans deux mesures successives, égalité impossible à vérifier.

Pour que les deux conducteurs soient parcourus par le même courant, la seule solution est qu'ils fassent partie du même circuit et donc observer leurs actions simultanées sur l'aimant. Si ces actions sont opposées, l'aiguille restera immobile.

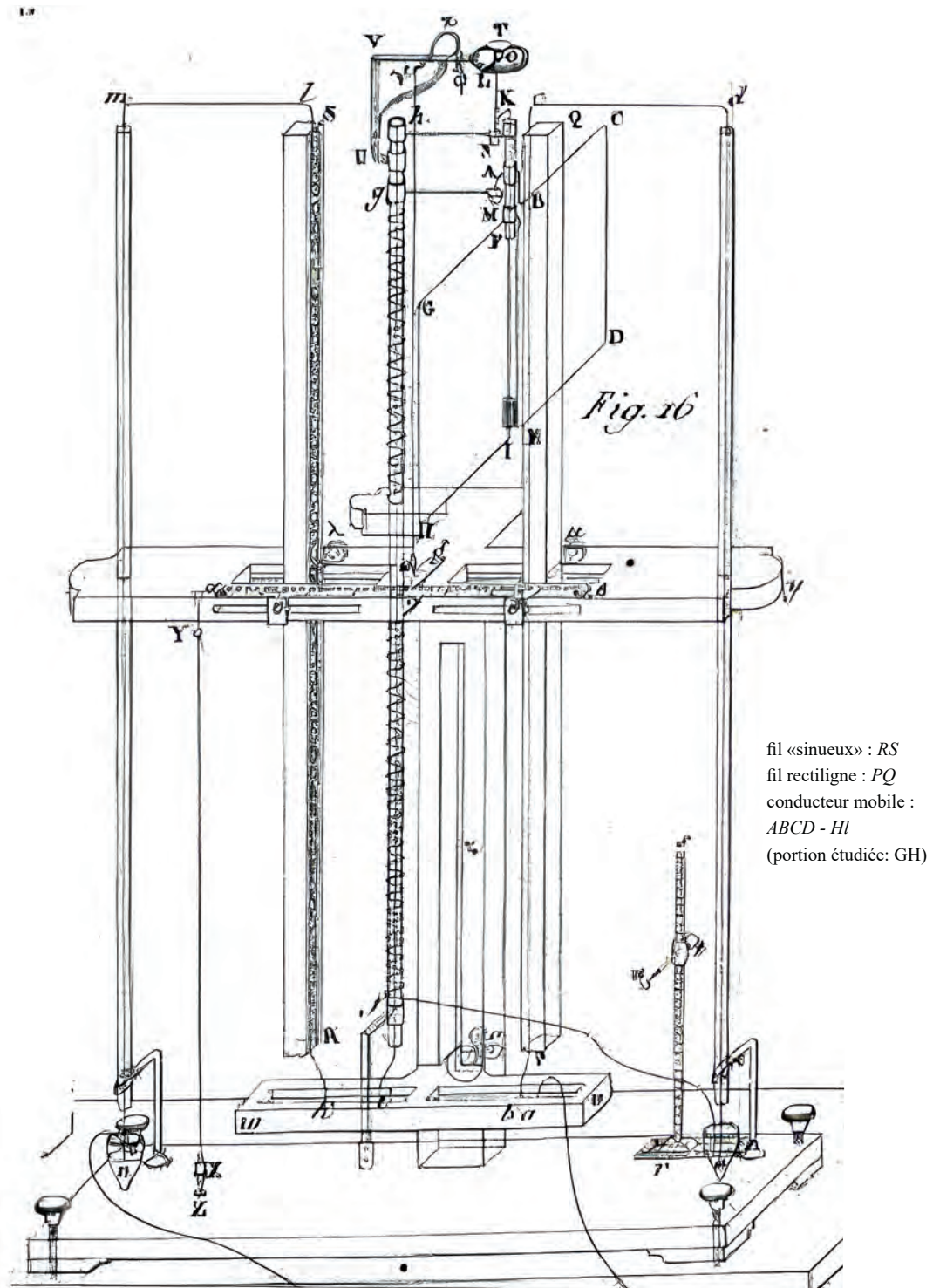
Le dessin de l'appareil décrit dans l'Analyse qu'Ampère fit ensuite de ce mémoire ¹¹⁶, où les deux courants sont parallèles et à égale distance de l'aimant, ne fut pas gravé car l'expérience dut encore se heurter à des difficultés. L'équilibre de l'aimant est en effet instable, la distribution du champ possédant un point singulier au milieu entre les deux fils, là où se trouve l'aimant.

C'est en remplaçant l'aimant par un conducteur mobile que l'expérience aboutit enfin (fig. 30).

¹¹⁴ « Note sur deux mémoires lus le 26 décembre 1820 et le deuxième les 8 et 15 janvier 1821 », dans *J. Phys.*, t. 92, 1821, p. 160. .

¹¹⁵ Arch. Ac. Sc., VIII, 164; voir aussi les *A.G.S.P.*, p. 256-258. L'expérience est décrite ultérieurement avec plus de détail par Ampère dans les Notes sur l'Exposé sommaire des nouvelles expériences ... », parues dans le *Recueil d'observations électrodynamiques*, 1822, p. 216-222 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 251.

¹¹⁶ *A.G.S.P.*, p. 258.



Ampère - recueil d'information, pl.6, fig16

Fig.30

Ampère explique a posteriori son premier échec, avec l'aiguille aimantée, par une raison théorique mettant curieusement en doute la loi d'addition qu'il veut prouver :

« les courants électriques de l'aimant ayant lieu dans des courbes fermées de grandeur comparable à celle des contours du conducteur fixe non rectiligne, si elles ne sont même beaucoup plus petites, il en résulte entre l'aimant et ce conducteur une action compliquée, qui ne se réduit plus à la somme des actions longitudinales égale à celle d'un conducteur rectiligne » ¹¹⁷.

C'est avec une partie annexe de cet appareil qu'Ampère songea à faire des mesures absolues de l'action exercée par un fil sur un aimant en fonction de leur distance grâce à la durée des oscillations de l'aimant.

En effet nous avons vu qu'Ampère a admis que la force entre deux éléments de courants est proportionnelle à $\frac{1}{r^2}$ seulement par analogie avec les autres forces d'attraction. Or, écrit-il, « Quelle que fût la force de ces analogies, je pensais que c'est à l'expérience seule de décider les questions de ce genre » ¹¹⁸.

Cependant il fut devancé par Biot et Savart dont le dispositif, il le reconnaît lui-même, était supérieur, et d'autre part il ne voulait utiliser que des conducteurs pour les fondements de sa formule électro-dynamique.

C'est aussi ce jour-là qu'Ampère énonce pour la première fois l'hypothèse selon laquelle les courants dans les aimants ne sont pas nécessairement coaxiaux : « L'effet des courants de l'intérieur d'un aimant doit (...) être le même soit qu'ils suivent des courbes parallèles à la surface ou des lignes tracées d'une autre manière dans les plans perpendiculaires à son axe » ¹¹⁹. Mais c'est dans le mémoire du 15 janvier qu'il revient plus en détail sur cette hypothèse que lui a suggéré Fresnel.

5. Neuvième mémoire : 8 et 15 janvier 1821. Calculs sur l'expérience de Biot

8 janvier

Retour à la théorie : muni de sa formule incomplète, Ampère tente d'en déduire par intégration l'action d'un fil infini sur un aimant.

En effet, le 4 décembre après la lecture par Ampère du mémoire où il donne pour la première fois cette formule, Biot est intervenu oralement pour donner sa propre formule (deux semaines donc avant la lecture de son mémoire sur le fil coudé).

Laplace, voulant clarifier la situation, demanda donc à Ampère d'essayer de déduire la formule de Biot de la sienne ¹²¹.

Ces mémoires n'ont pas été publiés mais sont conservés aux Archives de l'Académie des sciences. Celui du 8 janvier a pour titre : « Calcul de l'action qu'exerce sur un aimant cylindrique dont les dimensions sont très petites et qui ne peut que tourner dans un plan horizontal, un fil conducteur incliné à l'horizon, et placé dans un plan vertical passant par le centre d'inertie de cet aimant ».

Il s'agit donc exactement de l'expérience décrite par Biot le 18 décembre et dont le résultat était erroné.

¹¹⁷ *Ann. Mines*, t. v, 1820, p. 557.

¹¹⁸ *Recueil*, p. 222 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 256.

¹¹⁹ *Arch. Ac. Sc.*, VIII, 164.

¹²⁰ *Arch. Ac. Sc.*, VII, 166.

¹²¹ *Arch.*, carton XI, chem. 206 bis : « Monsieur le marquis de Laplace m'ayant proposé de voir si la manière dont j'explique l'action d'un courant électrique sur un aimant et celle de deux aimants l'un sur l'autre, en la ramenant à l'action mutuelle que j'ai reconnue entre deux courants électriques, s'accordait avec la loi qui résulte des expériences de M. Biot sur les oscillations d'un petit aimant en présence d'un fil conjonctif formant dans un plan vertical un angle dont les deux côtés sont également inclinés... » (fin du texte qui est suivi de calculs avec la formule réduite à un terme).

Ampère calcule d'abord l'action d'un élément du fil coudé sur un élément de courant circulaire de l'aimant cylindrique. Seule la composante horizontale de cette force faisant tourner l'aimant autour de son axe vertical, il trouve que le moment de cette force, intégré sur l'aimant, puis sur la totalité du fil et proportionnel à :

$$\frac{\sin \theta \cdot \sin b}{a} \left(1 + \frac{1}{\cos b} \right)$$

où θ est l'angle dont l'aimant est écarté de sa position d'équilibre, b l'angle formé par le fil coudé et a la distance du fil à l'aimant.

Ce moment est inversement proportionnel à la distance a , ce qui est conforme à la première loi de Biot sur l'action d'un fil infini, et nul lorsque $b = 0$, ce qui s'explique par le fait qu'alors les deux branches du courant sont accolées et opposées, leur action totale étant donc nulle.

Ampère voit encore un autre argument en faveur de son résultat dans le fait que si $\pi \leq b \leq 2\pi$, le moment est négatif. En effet dans ce cas l'aiguille se trouve dans l'intérieur de l'angle formé par le fil et tend à tourner dans l'autre sens. Cette inversion du sens de la force lorsque l'angle formé par le fil devient obtus, souligne Ampère, est au contraire incompatible avec la formule de Biot :

« J'avais cru d'abord, d'après ce que je savais des expériences du savant physicien qui a communiqué à l'Académie des mesures exactes des phénomènes dont nous nous occupons, que l'action dont je viens de calculer la valeur devait pour une même distance entre l'aiguille aimantée et le sommet de l'angle b croître proportionnellement à cet angle ; mais j'ai bientôt reconnu que cela ne pouvait s'accorder avec le changement de signe que doit, d'après les expériences de M. Ørsted, éprouver cette valeur quand b croissant graduellement est d'abord plus petit et ensuite plus grand que deux angles droits » ¹²².

15 janvier : *hypothèse des courants particulières dans les aimants.*

La première partie de ce mémoire prolonge les calculs du précédent mémoire. Au lieu de couder le fil conducteur, Ampère lui fait prendre diverses positions dans le plan vertical passant par le centre de l'aimant. Il espère encore que l'expérience permettra de partager entre son hypothèse et celle de Biot, mais les résultats de ses calculs sont trop incertains pour lui faire envisager une vérification expérimentale.

Il ne fera jamais référence à ces calculs et exceptionnellement seulement aux quelques expériences qui les accompagnèrent ¹²³.

La deuxième partie du mémoire est beaucoup plus importante pour la suite car elle concerne la structure des courants dans les aimants :

« Il s'agit de savoir s'ils sont situés concentriquement autour de la ligne qui joint les deux pôles de l'aimant, ou sont répartis dans toute sa masse autour de chacune de ses particules, toujours dans des plans perpendiculaires à cette ligne » ¹²⁴.

Cette dernière hypothèse fut suggérée à Ampère par Fresnel qui suivait toutes ses recherches avec attention ¹²⁵. Sa critique des courants coaxiaux dans les aimants se fonde essentiellement sur les parti-

¹²² Arch. Ac. Sc., viii, 166.

¹²³ Recueil, p. 343 ; Bull. Gen. et Uni. des annonces et des nouvelles scientifiques, t. iii, 1823, p. 21 ; J. Phys., t. 96, 1823, p. 5.

¹²⁴ J. Phys., I. 92, 1821, p. 163.

¹²⁵ Les notes inédites de Fresnel ont été publiées par J. Joubert : « Comparaisons sur la supposition des courants autour de l'axe avec celle des courants autour de chaque molécule », dans Coll. Mem., t. ii, p. 141-143 et p. 144-147.

cularités qu'ils créeraient clans un aimant cylindrique creux. L'aimantation d'une aiguille à l'intérieur du cylindre serait de sens contraire à celui prévu par la théorie magnétique; le magnétisme disparaîtrait par coupure longitudinale de l'aimant ... En outre des courants suivant la circonférence de l'aimant devraient provoquer un échauffement de l'acier lors de l'aimantation alors que les courants autour des particules peuvent être supposés ne pas dégager de chaleur.

L'argument le plus puissant d'Ampère en faveur des courants coaxiaux, l'analogie entre les hélices et les aimants, est en outre compatible avec l'hypothèse de Fresnel grâce à un nouveau recours à l'éther :

« Si, comme il est naturel de le penser, un courant électrique n'agit sur un autre qu'en imprimant à l'éther un mouvement dirigé parallèlement au sien, soit que les courants électriques d'un aimant fussent dans des courbes fermées (autour de l'aimant), ou séparément dans chaque particule, le mouvement de rotation imprimé à l'éther aurait lieu toujours dans le même sens »¹²⁶.

Après être intervenu pour appuyer la loi d'addition des éléments de courants l'éther, par ses propriétés mécaniques, justifie la théorie magnétique d'Ampère.

L'hypothèse des courants particuliers avait donc la préférence d'Ampère mais il ne la présenta que comme une hypothèse équivalente à celle des courants coaxiaux à cause des réticences qu'elle rencontra (chez Arago ou Laplace sans doute). En 1821 il écrit à son correspondant hollandais Van Beck :

« (Votre expérience) est bien évidemment en faveur de l'opinion sur la manière dont les courants électriques existent dans les aimants que je proposais comme la plus probable dans le Mémoire que je lus, il y a un an, à l'Académie Royale des Sciences. Je l'aurais seule admise dès cette époque sans l'opposition qu'elle éprouva de la part de ceux à qui je la communiquai, avant d'en parler à l'Académie ; c'est cette opposition qui me la fit présenter seulement comme une opinion qui avait quelques probabilités de plus en sa faveur, en attendant que j'eusse fait des expériences qui pussent décider la question. J'en essayai plusieurs pour atteindre ce but ; mais j'aurais voulu en pouvoir présenter qui ne laissassent aucun doute avant de les publier, et je n'y étais pas encore parvenu lorsque l'affection de poitrine dont je fus tourmenté l'année dernière l'obligea de suspendre tout recherche de ce genre »¹²⁷.

Quant aux courants dans le globe terrestre, qu'il est difficile de situer autour des « particules » de ce dernier, Ampère revient sur son hypothèse d'octobre qui attribue ces courants au hasard de la distribution des corps dans le globe. La différence de température entre le jour et la nuit pourrait être une meilleure cause, « d'après les expériences de plusieurs physiciens sur l'action galvanique produite par le contact de deux disques d'un même métal, dont la température est différente »¹²⁸.

L'action voltaïque due au contact entre corps différents ne serait alors qu'une perturbation de ce phénomène principal, expliquant l'orientation du champ magnétique terrestre.

Toutefois, comme il l'écrit à son ami Roux-Bordier en février 1821, ce ne sont encore là que conjectures :

« Ma première idée sur les courants électriques de la terre est que, s'étant établis dans le globe de l'Est à l'Ouest par l'action galvanique des matières qui le constituent, le globe s'est mis, par réaction, à tourner de l'Ouest à l'Est, comme le canon recule à mesure qu'il chasse le boulet en avant ; mais je me suis bien gardé d'imprimer cette conjecture et cent mille autres qui m'ont passé par la tête. D'ailleurs pourquoi tous les corps planétaires tourneraient-ils de l'Ouest à l'Est si c'était là la cause de leur rotation »¹²⁹.

126 Arch. Ac. Sc., x, 205.

127 *J. Phys.*, t. 93, 1821 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 212.

128 *J. Phys.*, t. 92, 1821, p. 164.

129 *Correspondance*, t. II, p. 567.

Les courants terrestres qui furent à l'origine de la théorie électrique du magnétisme d'Ampère s'accommodaient en fait assez mal avec l'hypothèse des courants particuliers dans les aimants et faute de trouver un phénomène global à l'origine de tels courants dans la terre, Ampère renonce à ce sujet malgré la richesse des hypothèses !

6. Caractères de cette première phase de recherches

Ce qui frappe bien évidemment au premier abord, c'est la rapidité et la fécondité d'Ampère pendant cette période : c'est avec une véritable frénésie qu'il s'attache à donner réalité au rêve de sa jeunesse.

Puis c'est l'ingéniosité de l'expérimentateur. A ce stade de la recherche, l'expérience est encore de la manipulation qualitative, voire du bricolage ; mais tout est invention dans ce bricolage. Comme il l'a lui-même souligné plus tard, « il ne (lui) a pas fallu seulement penser qu'il devait y avoir une action entre deux conducteurs voltaïques, mais qu'il fallait créer des instruments propres à réaliser cette action, *instruments entièrement différents de ceux qu'on employait jusqu'alors en physique* »¹³⁰.

Donc une très grande ingéniosité pour concevoir des dispositifs nouveaux, mais par contre une absence quasi-totale des mesures. Aucun résultat numérique, aucun chiffre dans les brouillons d'Ampère. La seule expérience pour laquelle il semble avoir utilisé un instrument de mesure, le chronomètre, a été la répétition de l'expérience de Biot en inclinant l'aimant.

Si, pendant cette phase de création, les expériences ont donc peu à voir avec « les mesures précises » sur lesquelles il déclare en 1826 avoir fondé sa théorie, elles jouent cependant un rôle fondamental dans cette édification. En effet, il ne faudrait pas croire, en voyant Ampère annoncer presque systématiquement ses résultats expérimentaux avant même d'avoir construit l'instrument correspondant, que ces expériences ne se révèlent être que de pures conséquences de la construction théorique.

Dans la plupart des cas, comme nous l'avons vu, le réel se révèle plus riche et plus complexe, voire inattendu, que ne l'a prévu la théorie. Ainsi alors qu'il avait prévu que deux hélices parallèles se comporteraient comme deux aimants, elle se comportent comme deux fils parallèles, manifestant l'importance de leur composante longitudinale et amenant Ampère à la loi de composition des éléments de courants. Ainsi c'est l'appareil destiné à mesurer les forces entre courants qui lui révèle l'action de la terre pour orienter un circuit plan, ou encore c'est l'échec de la première expérience avec le fil sinueux prévue le 26 décembre, qui l'incite à utiliser pour la première fois la méthode de zéro.

Cette période est donc marquée par une constante et étroite imbrication entre la réflexion théorique et la pratique expérimentale. C'est un véritable dialogue qui s'instaure avec le réel, et on ne peut dire que ce dernier manque de réaction, tantôt se refusant comme dans les tentatives de création de courants par induction, tantôt répondant à côté de la question et tantôt donnant satisfaction à la prévision théorique.

Il est donc difficile de souscrire entièrement à l'affirmation de P. Duhem pour lequel « sa formule fondamentale de l'Electrodynamique a été trouvée toute entière par une sorte de divination, les expériences indiquées par lui ont été imaginées après coup et combinées tout exprès, afin qu'il pût exposer selon la méthode newtonienne une théorie qu'il avait construite par une série de postulats »¹³¹.

En effet, s'il faut souligner que Duhem a été le premier à remarquer que les expériences de la *Théorie des phénomènes électro-dynamiques* ont peu participé à la création de la théorie, il ne faut pas pour cela supprimer le rôle fondamental de l'expérience, quoique différent de celui qui lui est plus tard assigné, dans cette phase de création.

120 Arch. Ac. Sc., xx, 305 (Demande par Ampère de la place d'examineur pour l'admission des élèves à l'Ecole Polytechnique en 1825).

131 P. DUHÉM, *La théorie physique, son objet et sa structure*, 1906, p. 326.

Ce point était toutefois difficile à déceler à travers les textes les plus connus d'Ampère et nécessitait de recourir aux analyses de ses mémoires moins largement diffusées ainsi qu'à ses manuscrits.

Il faut encore insister sur l'audace intellectuelle d'Ampère, et faire un sort à la version selon laquelle son hypothèse de base aurait été que « seuls les semblables interagissent » en conséquence de laquelle, si les courants agissent sur les aimants, il est naturel de penser qu'il existe des courants dans les aimants.

Nous avons vu au contraire qu'Ampère a été le seul de tous les physiciens contemporains qui ont étudié peu ou prou ce problème, à soutenir cette hypothèse. La plupart des autres physiciens ont attribué le nouveau phénomène à une magnétisation des fils conducteurs, ramenant ainsi l'inconnu au connu, alors qu'Ampère veut expliquer les phénomènes magnétiques, bien connus depuis Coulomb, par des courants électriques qui ne relèvent d'aucune théorie mathématique.

Cette hypothèse de base n'est d'ailleurs que dans une certaine mesure une hypothèse de structure. Nous verrons en effet les idées d'Ampère varier plusieurs fois à propos de la structure des courants dans les aimants ; il écrit ainsi en juillet 1822 au baron Maurice :

« Jusque là, il n'y a pas proprement d'hypothèse, mais *des analogies données par un grand nombre de faits*. Il est certain qu'elles suffisent pour prévoir d'avance (...) tout ce que je connais relativement à l'action entre un courant voltaïque et le globe de la terre ou un aimant »¹³².

L'affirmation de son empirisme est, comme le plus souvent en pareil cas, d'abord une réaction de défense ; on peut la rapprocher, par exemple, de celle de Biot défendant face à Fresnel ses lois de la double réfraction fondées sur la théorie de l'émission :

« Je n'ai jamais tenté dans mes recherches d'établir autre chose que des lois expérimentales »¹³³.

Cependant il est évident que les hypothèses, ou plutôt les modèles, jouent un rôle fondamental. Si le modèle de la mécanique newtonienne reste pour Ampère le fondement de toute branche des sciences physiques, la théorie ondulatoire de Fresnel pour laquelle il fallut, écrit-il en 1816, « bien malgré (lui), qu'(il) renonce à celle fondée sur l'émission qu'(il) aimait tant »¹³⁴, le marque profondément. Nous en avons vu la preuve dans l'argumentation décisive en faveur de la loi d'addition qu'il obtient par « la considération des mouvements de l'éther ».

Fresnel et Ampère, vivant sous le même toit, discutant de longues soirées ensemble, le premier n'a sans doute pas laissé le second dans l'ignorance de ses préoccupations d'alors sur l'éther et ses liens avec les corps transparents. La théorie ondulatoire commence à jouer un rôle de nouveau modèle structurel pour les autres branches de la physique.

La méthode même d'Ampère se rapproche de celle de Fresnel décrite en ces termes par R. Silliman : « He began with experiments that served to establish the phenomena and suggest theoretical ideas. He then cast his ideas in mathematical form and drew from them precise consequences »¹³⁵. Le va-et-vient entre expérience et théorie est possible grâce à des expériences relativement simples et essentiellement qualitatives. La physique d'Ampère est une physique sans mesures, sans nombres. La seule hypothèse de structure est celle relative aux aimants, la nature physique du courant électrique ne changeant rien aux lois des phénomènes.

¹³² *Correspondance*, t. II, p. 611.

¹³³ « Remarques sur un rapport de M. Arago », dans *Œuvres complètes d'A. Fresnel*, t. I, 1866, p. 588.

¹³⁴ *Correspondance*, t. II, p. 611.

¹³⁵ R. SILLIMAN, « Fresnel and the emergence of Physics as a discipline », dans *Historical studies in physical sciences*, vol. 4, 1972, p. 154.

7. L'interruption due à la maladie

Avec le mémoire lu les 8 et 15 janvier 1821, s'achève la première phase des recherches d'Ampère. Ayant déterminé sa formule, il s'apprêtait à parachever sa théorie du magnétisme et commença à rédiger quelques notes dans ce sens, mais une nouvelle attaque pulmonaire l'empêcha de continuer à travailler. Ampère était alors âgé de 46 ans mais selon ses contemporains la faiblesse de sa santé avait entraîné un vieillissement précoce. En outre pendant ces quelques mois il n'a pas ménagé sa fatigue ; en février 1821 il écrit à un ami :

« Tous mes moments sont comptés et (...) j'ai été parfois obligé de veiller très avant dans la nuit, chargé de deux cours (Ecole Polytechnique et Faculté), et ne voulant pas cependant laisser là absolument mes travaux sur les conducteurs voltaïques et les aimants »¹³⁶.

La rédaction de sa Notice destinée à la séance publique de l'Académie du 2 avril 1821 absorbe alors le temps dont il dispose.

En mars la maladie est là : « Je souffre beaucoup de la poitrine et il m'a fallu suspendre le cours de la Faculté, M. Cauchy m'y remplacera pour un mois ou six semaines »¹³⁷.

Et en avril c'en est fini du travail intellectuel : « A force de penser et d'écrire, je suis d'abord devenu comme stupide par moments, et ensuite affecté de douleurs dans la poitrine et d'oppressions qui m'obligent à suivre un régime de sangsues, de lait d'ânesse, etc. »¹³⁸. Il a même recours au magnétisme qui l'avait, dit-il, guéri de son mal de gorge deux ans plus tôt, mais cette fois apparemment sans succès puisqu'en août il écrit :

« Encore un de mes vifs chagrins, c'est d'avoir passé huit mois sans calculer les conséquences de mes sur l'action des courants électriques pour les comparer aux faits. Depuis qu'on m'a interdit ma pipe à cause de ma poitrine, je suis devenu presque incapable de travailler »¹³⁹.

Pendant cette période il se borne à répondre à ses correspondants étrangers et à tenter de faire comprendre sa théorie qui n'a pas reçu l'accueil qu'il attendait.

Ainsi répond-il aux lettres de Berzélius et Erman en expliquant leurs propres expériences à l'aide de sa théorie et en décrivant les siennes ; à G. de La Rive et S. van der Eyck, qui adoptent sa théorie électrique des aimants, il donne des détails supplémentaires sur cette théorie et discute des expériences qui y semblent contraires comme l'échec de Davy à obtenir l'action magnétique de Parc électrique¹⁴⁰.

Il fait également construire par Pixii en février 1821 un appareil où la seule amélioration importante par rapport aux précédents est l'utilisation de circuits mobiles astatiques, c'est-à-dire sur lesquels le magnétisme terrestre est sans influence : lorsque deux aimants parallélipipédiques sont accolés par leurs pôles opposés leur magnétisme n'agit plus à l'extérieur, « d'où M. Ampère a conclu par analogie qu'un conducteur mobile formé de deux circonférences égales et opposées n'éprouverait aucune action de la part du globe »¹⁴¹.

¹³⁶ *Correspondance*, t. II, p. 565.

¹³⁷ *Ibid.*, t. III, p. 908. D'après ses médecins, Ampère était atteint d'une « affection catarrhale chronique de la poitrine » ; cf « Ampère et la Provence », M. Gontard, Archives du Collège de France, dossier « Ampère ».

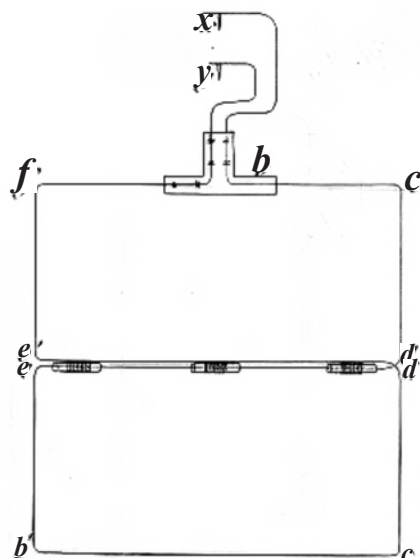
¹³⁸ *Correspondance*, t. II, p. 569.

¹³⁹ *Ibid.*, p. 570.

¹⁴⁰ « Lettre de M. Ampère à M. Arago (sur l'état magnétique des corps qui transmettent un courant d'électricité) » (Réponse à Berzelius), dans *A.C.P.*, t. 16, 1821, p. 119-129; *Recueil*, p. 99-108. « Lettre de M. Ampère à M. Erman, secrétaire de l'Académie Royale des Sciences de Berlin » (20 avril 1821), dans *Bibliothèque Universelle*, t. 17, 1821, p. 183-191 ; *Recueil* p. 113-119.

– « Extrait d'une lettre de M. Ampère à M. le Professeur de la Rive » (15 mai 1821), dans *Bibliothèque Universelle*, t. 17, 1821, p. 192-194 ;

Ce dispositif sera utilisé d'une manière légèrement différente ultérieurement les deux circuits opposés (rectangulaires) étant jointifs (fig. 31).



ACP t. 18, pl. 1 fig. 10

Fig.31

Indépendamment de Schweigger il utilise un « multiplicateur » pour augmenter l'effet du courant sur un aimant avec « un appareil où le même fil conducteur passe 120 fois entre deux chevalets toujours dans la même direction, afin d'exercer une action plus intense dans ce rapport » ¹⁴².

Il est assez étonnant de noter que le 18 juin 1821 Ampère lit un « Mémoire sur quelques nouvelles propriétés sur les axes principaux des corps » ¹⁴³. Sans doute s'agissait-il d'un travail en liaison avec son cours d'analyse et de mécanique à l'Ecole Polytechnique et ne nécessitant plus qu'une mise au point finale.

8. L'accueil fait au mémoire d'Ampère, en France et à l'étranger

La théorie d'Ampère fut loin de faire l'unanimité, aussi bien en France qu'à l'étranger. Arago qui prit activement son parti face à ses détracteurs à l'Académie rappelle que « peu d'année auparavant, les ondes lumineuses transversales de Fresnel avaient soulevé les mêmes incertitudes et de la part des mêmes personnes » ¹⁴⁴.

D'après son autre contemporain, E. Littré, « Les physiciens français se montrèrent d'abord contraires, croyant que les idées théoriques de M. Ampère étaient opposées à la doctrine de Newton (...). Repoussé de toutes parts, ou plutôt mal écouté et mal compris, M. Ampère ne se décourageait pas ; il soumettait à Laplace tous ses calculs analytiques, il prouvait aux géomètres que sa loi (...) rentrait dans le principe même de Newton » ¹⁴⁵.

¹⁴² *Correspondance*, t. II, p. 568.

¹⁴³ *M.A.R.S.*, T. V, 1821-1822, p. 86-152.

¹⁴⁴ ARAGO, *Cures complètes*, t. II, p. 69.

¹⁴⁵ E. LITTRÉ, dans *Essai sur la philosophie des sciences*, A.M. Ampère, t. II, 1843, p. LXXX.

La première cause en est la relative confusion du mémoire des *Annales de Chimie et de Physique*, qu'Ampère reconnaît lui-même et qui est due à une composition faite d'un collage de parties rédigées à des dates différentes.

En outre ses expériences étaient délicates à reproduire puisqu'il y fallait des appareils créés spécialement. Cependant ce sont ces expériences qu'Ampère voudrait d'abord voir reconnues. En mars 1821 il répond avec un certain agacement à son ami lyonnais Bredin qui n'avait pas compris plusieurs points de son mémoire :

« Personne ne le comprend ? Je suis sûr que ce qu'il cherchent à comprendre c'est la théorie dont je ne voudrais pas qu'on s'occupât encore, on l'adoptera du reste quand les faits seront bien connus. Ce sont les faits, les faits qu'il s'agit de bien connaître. Est-ce que les physiciens de Lyon ne peuvent pas distinguer dans mon mémoire, malgré le peu d'ordre qui y règne parce que je l'écrivais à mesure de nouvelles expériences, les faits nouveaux des théories ? Ce sont les faits au nombre de 5 ou 6 qu'on devrait du moins examiner »¹⁴⁶.

C'est pour cette même raison qu'il insiste dans la notice de l'Histoire de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1820, sur le fait que son travail est divisé en trois parties : « *faits relatifs aux actions courant courant et courant-terre, faits relatifs aux actions courants-aimants, et enfin recherches sur la loi mathématique (...)*. Cette distinction est d'autant plus importante que ces trois parties de (ses) recherches sur ce genre d'action sont absolument indépendantes les unes des autres, et (lui) semblent devoir être examinées séparément »¹⁴⁷.

Or ses expériences, contrairement à celles d'Ørsted, n'ont été répétées qu'à Paris, en particulier par Dulong au cours de l'Ecole Polytechnique et Thillaye au Collège royal Louis-le-Grand, et à Genève. Mais G. de La Rive qui reproduit les dispositifs d'Ampère dès leur parution souligne que « les ingénieux instruments inventés par A. Ampère demandent des ouvriers habiles et assez de frais »¹⁴⁸. C'est pour faciliter la diffusion de la théorie d'Ampère qu'il a adoptée qu'il propose quelques appareils simples permettant d'observer les principales actions électromagnétiques, en particulier des circuits mobiles sur des flotteurs.

Les physiciens hollandais A. van Beck et S. van der Eyck se satisfont également des preuves expérimentales fournies par Ampère¹⁴⁹.

Il n'en est pas de même pour Faraday qui réclame toujours davantage d'expériences en faveur de cette théorie des courants dans les aimants. Il faut dire que plusieurs expériences fondamentales d'Ampère ne furent reproduites à Londres que de longs mois après leur réalisation à Paris. En outre du point de vue théorique la réalité des courants électriques dans les aimants pose question au chimiste qu'est Faraday. Il justifie dans une lettre à G. de La Rive de septembre 1821 sa prudence théorique :

« (Ampère experiments on electro-magnetism) are few, and theory makes up the great part of what A. Ampère has published, and theory in a great many points unsupported by experiments when they ought to have been adduced. At the same time, M. Ampère experiments are excellent and his theory ingenious, and for myself I had thought very little about it before your letter came, simply because being naturally sceptical on philosophical theories »¹⁵⁰.

¹⁴⁶ *Correspondance*, t. III, p. 907.

¹⁴⁷ *Recueil*, p. 208 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 245.

¹⁴⁸ *Bibliothèque Universelle*, t. 16, J 821, p. 201 et t. 18, 1821, p. 269-286.

¹⁴⁹ A. VAN BECK, *Bibl. Univ.*, I. 17, 1821, p. 195 et S. van der EYCK, *Bibl. Univ.*, t. 20, 1822, p. 247-258.

¹⁵⁰ *The selected correspondence of Michael Faraday*, L.P. Williams, 1971, t. I, lettre n° 50 (12 septembre 1821), voir aussi lettre n° 55 à A. Marcat (15 janvier 1822).

Voilà pour les expériences. Pour la théorie, le langage ambigu d'Ampère qui parle souvent de « l'identité des fluides électriques et magnétiques » par un raccourci erroné au lieu de « l'identité de l'électricité et de la cause des phénomènes magnétiques », n'était pas pour éclairer ses contradicteurs ¹⁵¹.

Ainsi Davy lui écrit-il : « Quelques uns des faits que j'ai observés m'ont conduit à douter de *l'identité de l'électricité et du magnétisme* » ¹⁵², Il faut croire que les réponses d'Ampère n'ont pas été suffisamment claires car Davy comme Faraday restera sceptique sur l'existence d'un fluide impondérable circulant ainsi dans les aimants.

Une troisième cause de critiques est l'utilisation de courants infiniment petits, autour des particules des aimants, dans le calcul de l'action entre courants finis. C'est ainsi qu'un ami suisse d'Ampère, le baron Maurice, lui transmet une lettre de critiques qu'il a reçue :

« Je ne suis pas aussi satisfait que vous des développements de la théorie de M. Ampère. Ce n'est pas tant la contention d'esprit nécessaire pour saisir les actions des courants qui me répugne dans cette théorie que le grand nombre d'hypothèses toutes gratuites, *l'abus de la considération des infiniment petits avec lesquels on peut dire tout ce qu'on veut*, et le mélange de certaines idées dynamiques dont l'introduction n'est pas suffisamment motivée ni l'influence nettement caractérisée » ¹⁵³.

En France c'est à l'esprit de prévention qu'Ampère attribue la méfiance rencontrée, prévention qui quelques mois auparavant avait fait douter de l'expérience d'Ørsted et quelques années plus tôt avait empêché les Français d'admettre que le chlore était un corps simple :

« On résiste tant qu'on peut à changer les idées auxquelles on s'est accoutumé. C'est drôle à voir les efforts que font certains esprits pour tâcher de faire accorder, avec les nouveaux faits, l'hypothèse gratuite de deux fluides magnétiques différents des fluides électriques, uniquement parce qu'on y a accoutumé son esprit » ¹⁵⁴.

C'est bien sûr J. B. Biot qui est ici principalement visé. Nous avons vu que le mois de décembre 1820 a été une course contre la montre entre Ampère et Biot pour donner le premier la formule élémentaire des actions électromagnétiques. Cette rivalité qui amena Biot à annoncer sa propre formule le 4 décembre juste après la lecture par Ampère de son mémoire, avant d'avoir terminé ses expériences sur le fil coudé destinées à déterminer cette formule, se traduisit de manière éclatante lors de la séance publique de l'Académie des Sciences du 2 avril 1821.

Lors de cette séance annuelle où les académiciens faisaient part des principales recherches de l'année écoulée, Ampère et Biot firent chacun une lecture sur les récentes découvertes électromagnétiques. D'après une note inédite d'Ampère à la Société Philomatique, Biot lui demanda quelque temps auparavant le mémoire d'Erman qu'il avait reçu dans le but de rédiger une notice sur l'électromagnétisme, « mais ne dit point, ce qui était si naturel, que ce qu'il allait écrire dût être lu à la séance publique (...). M. Biot n'a fait savoir ni à Arago, ni à moi, qu'il voyait tous les midi à l'Institut qu'il voulut rendre compte à la séance publique de ce que nous avions pu faire. Je ne l'appris que par hasard à l'Observatoire le vendredi 30 mars (la séance étant trois jours après). Nous devons naturellement penser que ce singulier silence n'indiquait pas que dans le compte-rendu qui se préparait, les résultats de nos expériences fussent rapportés comme nous pouvions le désirer. Telle fut du moins ma pensée et je formai le dessin de lire aussi sur un sujet qui me semblait fait pour intéresser (...). Les personnes dont l'opinion est du plus grand poids pour moi approuvèrent ce dessein ; je l'ai exécuté (...). Comment M. Biot a-t-il pu voir en cela quelque chose

¹⁵¹ A.C.P., t. 16, 1821, p. 119 et A.C.P., t. 15, 1820, p. 212.

¹⁵² *Correspondance*, t. II, p. 564.

¹⁵³ *Ibid.*, t. III, p. 924.

¹⁵⁴ *Ibid.*, t. II, p. 566.

de peu délicat, quand il rendait compte des travaux de M. Arago et des miens sans nous en prévenir, sans nous donner le moindre renseignement sur ce qu'il en disait ? J'ai vu que, du moins en partie, le motif qui m'avait porté à lire n'était pas dénué de tout fondement puisqu'en rappelant en effet dans sa notice que quelques uns des principaux faits n'étaient dus qu'à moi, M. Biot les a présentés comme une preuve que j'avais habilement profité des idées de M. Ørsted sur une prétendue action révolutionnaire » ¹⁵⁵.

En effet dans sa lecture, publiée dans le *Journal des Savants*, Biot abandonne l'ordre des découvertes pour développer longuement ses propres résultats et présenter rapidement ceux d'Ampère comme de simples conséquences du principe de l'action et de la réaction et du caractère révolutif de la force électromagnétique.

Pour sa part Ampère dans sa lecture, publiée dans la *Bibliothèque Universelle*, ne parle même pas des résultats de Biot et insiste sur l'unification que sa propre théorie crée au sein de la physique.

L'opposition entre les deux hommes était totale. Il est cependant difficile de généraliser à une opposition entre Laplace et ses disciples, essentiellement Biot et Poisson, et les physiciens partisans de nouvelles méthodes en physique : Fresnel, Ampère, Dulong, Petit, ... regroupés derrière Arago. S'il est certain que Laplace, alors âgé de 71 ans, était davantage favorable à une théorie newtonnienne de l'électromagnétisme, la solidité de son œuvre face à l'avenir de la science était suffisamment assurée pour qu'il puisse se poser en arbitre plutôt qu'en partisan ¹⁵⁶.

Litré est sans doute excessif lorsqu'il affirme qu'Ampère soumettait tous ses calculs à Laplace, mais il est de fait que ce dernier suivait avec attention ses recherches, qu'il est à l'origine de l'expérience vérifiant l'action magnétique d'un circuit de grande dimension (expérience qui fait suggérer à Ampère l'utilisation de l'effet électromagnétique pour le télégraphe), et qu'enfin c'est encore lui qui demande à Ampère de tenter de déduire la formule de Biot de la sienne propre. il se montre plus intéressé par « l'avancement de la science » que par la défense d'un capital scientifique !

¹⁵⁵ Arch. Ac. Se., XI, 206 bis.

¹⁵⁶ Cf. R. Fox, « The background to the discovery of Dulong and Petit's law », dans *British Journal for history of science*, vol. 4, 1968, p. J-22. - R. Fox, « The rise and fall of laplacian physics », dans *Historical studies in physical sciences*, vol. 4,

DÉFENSE ET ILLUSTRATION DE LA NOUVELLE THÉORIE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Quelques mois seulement après la découverte de l'action d'un courant sur un aimant, Ampère a établi les deux fondements de sa théorie : un modèle électrique de l'aimant et une formule permettant de calculer toutes les actions entre courants.

L'événement que constitue la découverte des rotations continues par Faraday à l'automne 1821 marque le point de départ d'une nouvelle phase dans les recherches d'Ampère. Abandonnant la théorie du magnétisme à laquelle il méditait, il reprend aussitôt les expériences de Faraday, les modifie, répond à ses critiques. Ces expériences lui font découvrir une condition d'équilibre relative aux conducteurs mobiles et cette condition entraîne elle-même la détermination de la constante figurant dans sa formule.

Les doutes de Faraday sur la réalité de l'existence des courants dans les aimants lui font rechercher de nouveaux arguments en faveur de l'hypothèse de courants situés autour des particules des aimants et préexistant à l'aimantation. C'est lors de cette recherche sur le magnétisme qu'il passe à côté de la découverte de l'induction avec A. de La Rive.

Cette période qui s'étend de l'automne 1821 à l'automne 1822 est donc marquée par une recherche tous azimuts dont les objectifs successifs sont déterminés plus par des facteurs externes que par le développement interne de la théorie.

I. LES ROTATIONS CONTINUES (HIVER 1821-1822)

1. Modifications de l'expérience de Faraday

Au retour de sa tournée d'inspection de l'été 1821, Ampère a quelque peu oublié l'électromagnétisme. Il a refait pour ses amis lyonnais les expériences que ceux-ci ne parvenaient pas à reproduire, mais il a surtout discuté philosophie, psychologie et politique¹

Comme il le reconnaît lui-même, c'est le « Mémoire sur les mouvements électromagnétiques et la théorie du magnétisme » de Faraday qui ravive son intérêt pour la nouvelle science : « En arrivant ici (à Paris), la métaphysique remplissait ma tête ; mais, depuis que le mémoire de M. Faraday a paru, je ne rêve plus

¹ En juin 1821, il écrit à son ami lyonnais Bredin : « Ce qui m'agite le plus à présent, ce sont les événements de la Grèce », *Correspondance du grand Ampère*, L. DT LAUNAY, t. II, 1943, p. 921.

que de courants électriques. Ce mémoire contient des faits électromagnétiques très singuliers, qui confirment parfaitement ma théorie, quoique l'auteur cherche à la combattre pour lui en substituer une de son invention »².

En effet, en septembre 1821, Faraday a annoncé dans le Journal de la Royal Institution qu'il avait obtenu la rotation continue d'un aimant sous l'action d'un conducteur et réciproquement. Il a même fait parvenir l'appareil destiné à cette expérience à Hachette et Ampère (pratique qu'Ampère aurait dû imiter s'il avait voulu ne pas voir ses résultats expérimentaux méconnus outre-manche !)³.

Le premier sujet d'étonnement pour Ampère dans cette rotation continue d'un conducteur autour d'un aimant (fig. 32) est qu'« ainsi la circulation de l'électricité dans un système de corps en contact, *produit une force vive*, capable au moins de vaincre les frottements d'un fil mobile »⁴.

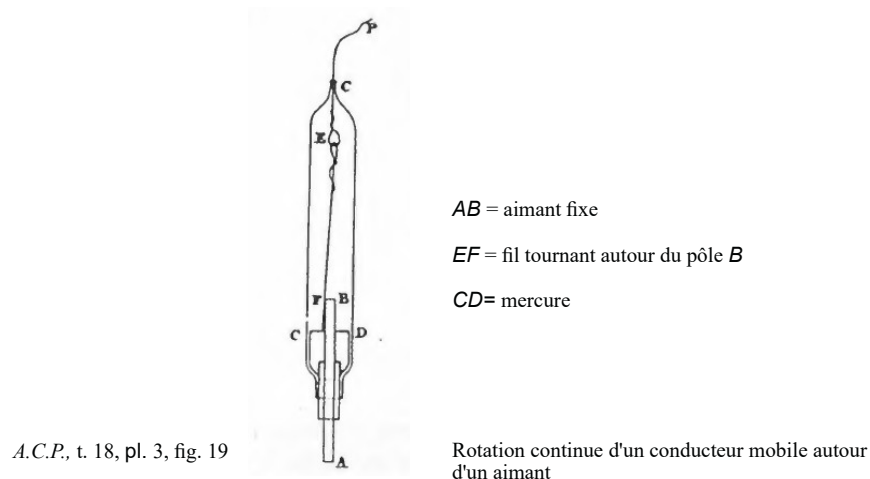


Fig. 32

Mais ne pouvant expliquer cette production de force vive sans dépense de travail, il s'attache à faire varier les conditions de l'expérience et à l'intégrer à sa théorie.

D'abord il remplace le conducteur mobile de Faraday par un fer à cheval relié à une couronne (fig. 33), et le mercure par de l'acide distillé, diminuant ainsi les frottements et augmentant la mobilité du système.⁵

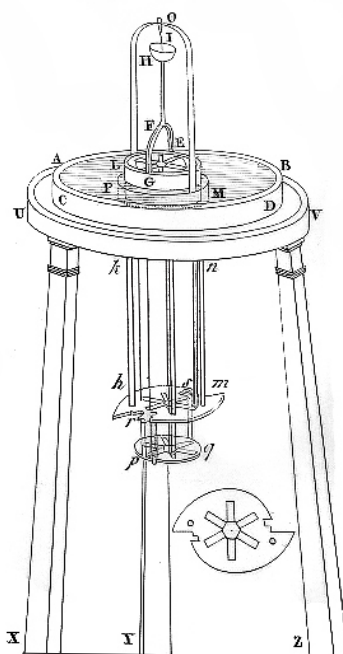
La cuve cylindrique ABCD étant en zinc et le conducteur mobile LOM en cuivre, l'appareil est lui-même électromoteur. Cette expérience présente ainsi l'intérêt de montrer « que le courant qui est dans la pile »

² *Correspondance du grand Ampère*, t. II, p. 576 et le 10 juillet 1822, il écrit à Faraday : « Vos découvertes (...) sont la principale cause de ce que j'ai pu ajouter à ce que j'avais fait il y a deux ans sur les phénomènes électrodynamiques », *Correspondance*, t. II, p. 586. Le mémoire de Faraday est paru en 1821 dans le t. 18 des *A.C.P.*, p. 337-370.

³ L'appareil a été envoyé à Paris le 18 octobre 1821, avec une lettre (disparue) de Faraday (*A.C.P.*, t. 18, 1821 p. 329) et Ampère reproduit l'expérience devant l'Académie des Sciences le 19 novembre 1821. ''

⁴ *A.C.P.*, t. 18, 1821, p. 330 (note ajoutée par Ampère à la fin de la « Note sur un appareil à l'aide duquel on peut vérifier toutes les propriétés des conducteurs » dans le cahier de novembre 1821).

⁵ Quelques mois plus tard, Ampère reconnaît que dans les rotations continues, « la résistance du mercure rend ces expériences assez difficiles, il fait recouvrir la surface du mercure d'eau acidulée, frapper sur l'appareil quand on voit le conducteur mobile s'arrêter et employer une très forte pile », Addition au Mémoire d'A. de la Rive lu le 4 septembre 1822, *Recueil*, p. 291



A.C.P., t. 18, pl. 3, fig. 22 et fig. 21

Fig. 33

agit comme celui du conducteur, tant pour les attractions et les répulsions, que pour le mouvement toujours dans le même sens » ⁶.

Cette rotation continue est ensuite obtenue sous l'action du seul magnétisme terrestre en augmentant le diamètre du conducteur mobile puis sous l'action d'un autre conducteur en remplaçant l'aimant par un solénoïde. ⁷.

2. Critique par Ampère des explications de Faraday

Dans la recherche d'une explication théorique de ces expériences, Ampère se fait aider par un de ses anciens élèves de l'Ecole Polytechnique Felix Savary qui rédigea les « Notes relatives au mémoire de M. Faraday » qui suivent celui-ci dans les *Annales de chimie et de Physique* ⁸.

⁶ *Correspondance*, t. II, p. 613. L'expérience est montrée à l'Académie le 3 décembre 1821.

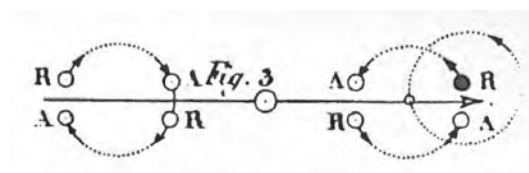
⁷ *Bulletin des sciences de la Société Philomatique*, 1822, p. 21.

⁸ A.C.P., t. 18, 1821, p. 370-379. – Les Notes sont sans nom d'auteur dans les *Annales* ; dans le *Recueil* elles sont signées de Savary et Ampère mais dans le Bulletin de Férussac, le rédacteur Roche écrit : « On trouve dans le *Recueil*... de M. Ampère, p. 125, que (ces Notes) sont de MM. Savary et Ampère; et nous tenons de la bouche de ce dernier qu'elles ont été faites par M. Savary, et qu'il n'y a joint son nom que pour indiquer qu'il y donnait son assentiment » (*Bulletin général et universel des annonces et des nouvelles scientifiques*, t. II, 1823, p. 394). A cette époque, Savary aida en outre Ampère dans un travail de correction d'épreuves (*Correspondance*, t. II, p. 575).

Le « Mémoire sur les mouvements électromagnétiques et la théorie du magnétisme » de Faraday (*Quarterly Journal of Science*, 1t. 12, 1822, p. 158 et A.C.P., t. 18, 1821, p. 337) a été reproduit dans *Coll. Mem.*, t. II, p. 158-154. Pour Faraday l'action entre un pôle magnétique et un fil conducteurs explique uniquement par la tendance du fil à tourner autour du pôle et réciproquement.

Il s'agit d'abord de justifier la première expérience, fondamentale, de Faraday, à savoir le fait qu'un conducteur rectiligne vertical est alternativement attiré et repoussé par un même pôle magnétique quand il se déplace parallèlement à lui-même devant ce pôle, et a donc tendance à tourner autour de lui (fig. 34).

A.C.P., t. 18, pl. 4, fig. 3



A = attraction
R = répulsion
(La flèche horizontale représente l'aimant)

Fig. 34

La question est promptement résolue : « Quand on remplace, dans cette expérience, l'aimant par un conducteur plié en hélice, *il est aisé de déduire des formules données par M. Ampère* l'équation d'une courbe fermée telle que le fil vertical exerce des actions contraires sur la moitié du cylindre la plus voisine, suivant qu'il est situé au-dedans ou au-dehors de cette courbe : on trouve ainsi qu'elle passe par les deux extrémités de l'hélice. Dans l'aimant, (...) la même courbe se change en une courbe peu différente qui passe par deux points situés à une petite distance des extrémités de l'aimant. Ces deux points sont ceux autour desquels tourne en effet le fil conducteur dans l'expérience décrite ici par M. Faraday, *conformément à la théorie de M. Ampère* »⁹.

Bien que le calcul fût « aisé », il n'est pas donné, pas plus que la courbe en question ! En fait il est probable qu'Ampère et Savary ont reculé devant la complexe démonstration analytique. Les autres expériences de Faraday sont d'ailleurs expliquées de manière purement qualitative dans la théorie d'Ampère.

Cependant une des critiques adressées à Faraday est que « l'action révolutive du fil conducteur et d'un aimant l'un autour de l'autre, que M. Faraday considère comme un fait primitif dans tout ce mémoire, ne suffirait pas pour soumettre les phénomènes au calcul »¹⁰.

La critique principale est toutefois plus profonde. Reconnaisant que les faits peuvent s'expliquer « également bien des deux manières », Ampère attribue à sa propre théorie l'avantage, fondamental à ses yeux, de n'utiliser que des forces dirigées suivant la droite qui joint les éléments interagissant et obéissant au principe de l'action et de la réaction. Ainsi « ces faits rentrent dans les lois générales de la physique, et on n'est pas obligé d'admettre comme *fait simple et primitif une action révolutive* dont la nature n'offre aucun autre exemple, et qu'il nous paraît difficile de considérer comme tel »¹¹.

En 1822, dans une lettre à son ami A. de La Rive, Ampère insiste encore sur les qualités de ce « fait primitif » : « N'est-il pas évident que c'est dans l'action de deux choses de même nature comme les deux conducteurs et non dans celle de deux choses hétérogènes comme un conducteur et un aimant qu'il faut chercher le fait primitif ? »¹².

Face à Faraday, Ampère se révèle donc comme nourri de philosophie newtonienne. Si la communication se fait mal au plan théorique, l'échange est cependant enrichissant pour chacun au plan expérimental.

Ainsi Faraday, discutant la théorie magnétique d'Ampère, fournit une expérience en sa faveur lorsqu'il tente de reproduire avec un cylindre creux aimanté les propriétés du solénoïde d'Ampère.

⁹ A.C.P., t. 18, p. 370.

¹⁰ Ibid., p. 371.

¹¹ A.C.P., t. 18, p. 374.

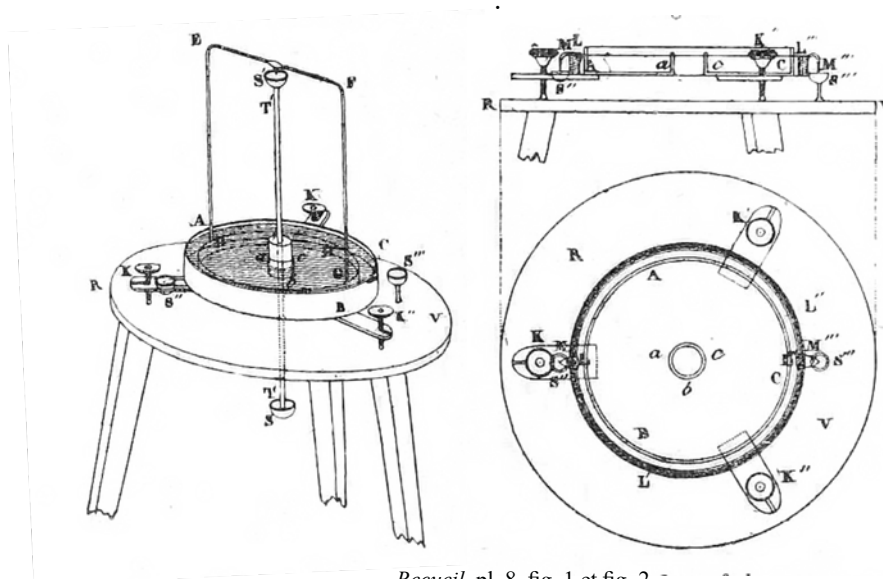
¹² Correspondance, t. II, p. 605.

Si les extrémités sont bien des pôles magnétiques, par contre une petite aiguille aimantée placée devant le cylindre ne le pénètre pas comme elle le fait avec un solénoïde. Cette différence implique pour Faraday que les courants dans l'aimant ne peuvent être disposés comme ceux de l'hélice. Ce à quoi Ampère, ou plutôt Savary, répond dans les « Notes » qui suivent le mémoire de Faraday qu'effectivement cette différence ne peut s'expliquer que par la disposition des courants dans l'aimant autour de ses particules et non autour de son axe. (Cette expérience avait déjà été suggérée par Fresnel en décembre 1820 pour justifier l'hypothèse des courants particuliers).

3. Rotations continues sans aimants

Les expériences de rotation de Faraday n'étaient relatives qu'à un aimant et un courant. Mais pour Ampère le fait fondamental étant l'action courant-courant, il faut obtenir une rotation continue par l'action d'un circuit sur un autre circuit. Ses résultats, communiqués à l'Académie les 3 et 10 décembre 1821 et 7 janvier 1822, sont consignés dans les *Annales de Chimie et de Physique* de 1822¹³.

Le dispositif imaginé en novembre 1821 (fig. 33) est d'abord modifié en remplaçant l'aimant par son équivalent électrodynamique, c'est-à-dire par des spires horizontales concentriques (fig. 35).



Recueil, pl. 8, fig. 1 et fig. 2

Fig. 35

Pour augmenter l'effet, l'appareil qui était en fait une pile refermée sur elle-même est alors relié à une puissante pile extérieure ce qui rend la vitesse de rotation plus notable¹⁴. C'est ainsi qu'Ampère arrive à ces

¹³ « Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électrodynamiques obtenus par A. Ampère au mois de décembre 1821 », dans *A.C.P.*, t. 20, 1822, p. 60-74.

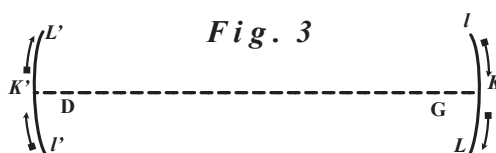
¹⁴ « Dans mes expériences du mois de décembre 1821, je fus assez heureux pour obtenir le mouvement de révolution continu dans ces deux cas (entre deux conducteurs et entre un conducteur et la terre) ; mais, à cause de l'imperfection des appareils dont je me servais d'abord pour produire ce mouvement, il n'avait lieu qu'avec une extrême lenteur », « Notice sur les nouvelles découvertes électromagnétiques faites par différents physiciens depuis le mois de mars 1821 », dans *Journal de Physique*, t. 94, 1822, p. 64 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 241. Ce n'est qu'en mars 1822 qu'il rend notable le mouvement de rotation (*Journal de Physique*, t. 93, 1821, p. 467 et *Coll.*

dispositifs complexes qui déroutent à la première lecture. Ces expériences ont une histoire, et elles ont parfois une origine « accidentelle » ; ici ce sont des épigones de celles de Faraday.

Pour déterminer l'action des spires horizontales fixes sur les branches verticales du conducteur mobile parcourues toutes deux par un courant descendant, Ampère utilise une conséquence de ses premières recherches qui lui sera souvent utile par la suite :

« Il y a attraction entre deux conducteurs voltaïques, dont les directions forment un angle droit quand le courant électrique qui les parcourt va dans tous les deux en s'éloignant ou en s'approchant de la perpendiculaire commune qui en mesure la plus courte distance, et il y a répulsion quand l'un des courants va en s'éloignant de cette perpendiculaire et l'autre en s'approchant » ¹⁵.

Ainsi le courant vertical descendant de projection G (fig. 36) est attiré par la portion horizontale voisine KL et repoussé par la portion KL', de même le courant de projection D est attiré par K'I' et repoussé par KL.



Recueil., pl. 8, fig. 3

Fig. 4

Fig. 36

Le conducteur mobile DEFG tourne donc en sens inverse du courant dans la spirale. Cette explication néglige toutefois l'action des courants dans la solution acide et celles subies par la partie horizontale EF et la couronne du conducteur mobile.

Après avoir ainsi décrit une rotation continue entre courants sans aimant, Ampère obtient un lent mouvement du même conducteur mobile sous l'action des seuls courants terrestres en supprimant la spirale. L'expérience, sur le résultat de laquelle plane un doute, serait semblable à la précédente, les courants circulaires terrestres remplaçant la spirale ¹⁶.

Ces expériences ainsi que celle imaginée par Savary pour montrer que « les courants voltaïques qui ont lieu dans l'eau acidulée exercent les mêmes actions que les courants établis dans les conducteurs métalliques » ¹⁷ à l'aide d'une spirale tournant à la surface du liquide conducteur sont complexes. Elles font en effet intervenir des champs de configuration géométrique non simple.

4. Rotation d'un aimant autour de son axe

Dans son mémoire Faraday avait affirmé l'impossibilité de faire tourner un aimant autour de son axe. Ampère relève le défi et tente d'obtenir ce mouvement « en faisant agir des aimants disposés de toutes

¹⁵ A.C.P., t. 20, 1822, p. 62 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 194.

¹⁶ A.C.P., t. 20, J 822, p. 64 et 196. - Cette expérience qui doit en effet produire une rotation continue par l'action de la terre sur la branche horizontale supérieure de l'appareil (alors qu'Ampère l'attribue à l'action sur les branches verticales) devait être vraiment peu nette car lorsqu'il revient sur son explication quelques mois plus tard, il écrit qu'elle doit amener une orientation fixe du circuit mobile : « Je voulais à cette époque examiner en détail les phénomènes par lesquels cette action (la rotation sous la seule influence de la terre) se manifeste; d'autres occupations m'en détournèrent encore, et je ne remarquai même pas que l'action du conducteur spiral LL'L'' et celle de la terre devaient, d'après ma théorie, produire des phénomènes tout différents sur un conducteur mobile tournant autour d'un axe vertical (...). L'action du conducteur spiral tend à faire tourner le conducteur vertical mobile toujours dans le même sens et celle des courants terrestres tend, au contraire, à lui donner une direction fixe » ! - Préface au *Mémoire d'A. de La Rive* lu le 4 septembre 1822, *Recueil*, p. 260.

¹⁷ A.C.P., t. 20, J 822, p. 66 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 198.

les manières qu'(il) put imaginer sur les conducteurs mobiles dont (il) s'était servi jusqu'alors dans toutes (ses) expériences »¹⁸.

Il y parvient en faisant traverser le corps de l'aimant par une partie du courant qui doit agir sur lui (fig. 37).

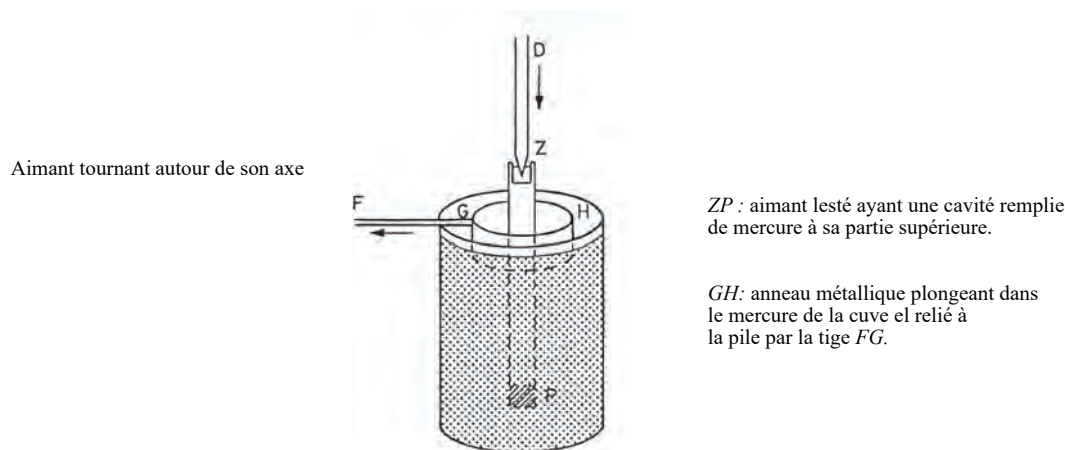


Fig. 37

Le succès est d'abord expliqué par l'action de la portion de courant qui traverse l'aimant sur les courants propres de l'aimant, mais peu après il se rend compte que « l'action et la réaction ayant lieu sur des particules du même corps, il n'en peut résulter aucun mouvement dans ce corps »¹⁹.

La rotation est alors attribuée à l'action du fil vertical situé au-dessus de l'aimant et cette expérience est utilisée ultérieurement comme argument en faveur des courants particuliers dans les aimants²⁰.

Ce n'est qu'en mars 1822 qu'Ampère explique le phénomène par l'action des courants dans le mercure. Il semble que son attention ait été attirée sur le rôle de ces courants dans les conducteurs liquides par une expérience de Davy, où l'on voit le mercure parcouru par un courant tourbillonner autour d'un conducteur, sous l'action d'un pôle magnétique²¹.

En effet, pendant qu'il rédige son mémoire, Ampère écrit à Van Beck que, après avoir attribué la rotation de l'aimant sur son axe à l'action du fil conducteur vertical, de nouvelles réflexions lui font penser que ces mouvements « sont dûs beaucoup moins à l'action de ce fil qu'à celle des courants électriques établis dans le mercure, et dont la réaction est la cause de la rotation du mercure dans l'expérience de Sir H. Davy »²².

18 «Notes sur l'exposé sommaire des nouvelles expériences électro-magnétiques faites par différents physiciens depuis le mois de mars 1821 », *Recueil*, p. 235. Ampère cherche le phénomène dès octobre 1821 mais ne le présente à l'Académie des Sciences que le 7 janvier 1822.

19 *Bulletin des Sciences de la Société Philomatique*, 1822, p. 22. C'était l'hypothèse de Faraday qui attribuait la rotation à l'action du courant traversant l'aimant sur le pôle magnétique de celui-ci.

20 « Réponse à la lettre de M. Van Beck », dans *Journal de Physique*, t. 93, p. 454, et *Coll. Mem.*, t. II, p. 220.

21 H. DAVY, *A.C.P.*, t. 25, 1824, p. 64 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 207. Un résumé des expériences de Davy (ainsi que d'autres physiciens) est paru plus tôt dans le *Bulletin des Sciences de la Société Philomatique*, 1822, p. 21-23 ; Ampère rapporte une expérience de Faraday qui fait aussi intervenir les courants dans le mercure dans « l'Exposé sommaire ... » lu le 8 avril 1822 (*Journal de Physique*, t. 94, 1822, p. 63 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 240).

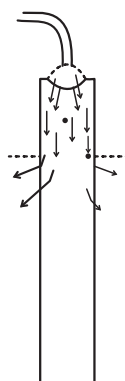
22 « Réponse à M. Van Beck », dans *Journal de Physique*, t. 93, 1821, p. 455 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 222.

Ces courants dans le mercure ont un rôle fondamental pour Ampère puisque c'est par leur seule action sur les courants de l'aimant qu'il explique aussi bien son expérience sur la rotation de l'aimant autour de son axe que celle de Faraday sur sa rotation autour d'un conducteur ²³.

Son but ultime est toujours de réduire les phénomènes électromagnétiques à des forces d'attraction ou de répulsion entre éléments de courants. Au contraire, Faraday tente d'expliquer chaque nouvelle expérience à l'aide du « fait primitif » que constitue la rotation d'un conducteur autour d'un pôle magnétique.

Ainsi à la lettre d'Ampère (perdue) qui lui annonçait sa réussite à faire tourner l'aimant autour de son axe, Faraday répond le 2 février 1822 :

« Vous exprimez votre opinion que cette expérience doit décider la question de savoir si les courants électriques supposés par votre théorie existent autour de l'axe de l'aimant ou autour de chacune de ses particules: d'où je conclus que votre opinion sur ce point diffère de celle que j'ai présentement puisque cela me semble être une modification de la révolution d'un fil autour d'un pôle». En effet, pour lui, le courant arrivant au sommet de l'aimant se répartit dans sa masse (fig. 38) et chaque ligne de courant « se trouvera donc dans la situation du fil tournant et tendra à tourner autour du pôle : comme toutes les lignes agissent dans le même sens ou tendent à suivre le même chemin autour du pôle, l'aimant entier se met à tourner » ²⁴.



Correspondance du Grand Ampère, p. 910

Fig. 37

Cette période est celle du plus grand échange entre les deux savants. Si ultérieurement ils continuent de s'envoyer leurs mémoires, leurs directions divergent : Ampère s'oriente de plus en plus vers l'utilisation de sa formule tandis que Faraday s'intéresse à l'électrostatique et l'électrochimie.

La coupure est déjà soulignée par Faraday lui-même en février 1822 :

« Je regrette que mon insuffisance dans les connaissances mathématiques me rende inapte à comprendre ces sujets. Je suis naturellement sceptique en matière de théorie et par conséquent vous ne devez pas m'en vouloir de ne pas admettre immédiatement ce que vous avez avancé. L'ingéniosité et les applications sont surprenantes et exactes, *mais je ne puis comprendre comment les courants sont produits* et particulièrement s'ils sont supposés existant autour de chaque atome ou particule et *j'attends de nouvelles preuves de leur existence avant de les admettre* » ²⁵.

²³ L'analyse des forces dues aux courants dans le mercure, donnée dans les « Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électrodynamiques » (4.C.P., t. 20, 1822, p. 69 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 200) est reprise dans la *Théorie des phénomènes électrodynamiques*, 1826, p. 165-171, et *Coll. Mém.*, t. II, p. 145-150.

²⁴ *Correspondance*, t. II, p. 913, Ampère répond le 10 juillet 1822 à Faraday que des forces intérieures ne peuvent créer de mouvement (*Correspondance*, t. II p. 589).

²⁵ *Correspondance*, t. II, p. 913.

5. Conséquences théoriques des expériences de rotations continues

La principale conséquence de ces expériences de rotations continues ne fut pas, comme on pourrait le penser, la recherche de l'utilisation de la force électromagnétique comme productrice de force mécanique.

Ces expériences créèrent un grand étonnement théorique. Sans qu'on ose prononcer le terme, c'était le mythe du mouvement perpétuel, ou du moins sans dépense de travail, qui resurgissait plus d'un siècle après son élimination du champ de la science.

Ainsi dans l'« Exposé sommaire des nouvelles découvertes électro-magnétiques faites par différents physiciens depuis le mois de mars 1821 », lu par Ampère à la séance publique de l'Académie des Sciences du 8 avril 1822, celui-ci conclut :

« Un mouvement qui se continue toujours dans le même sens, malgré les frottements, malgré la résistance des milieux, et *ce mouvement produit par l'action mutuelle de deux corps qui demeurent constamment dans le même état*, est un fait sans exemple dans tout ce que nous savions des propriétés que peut offrir la matière inorganique »²⁶.

Négligeant les transformations chimiques opérées dans la pile, Ampère, ne pouvant attribuer cette production de force vive à des forces, les attribue au mouvement.

En quelque sorte le mouvement serait par lui-même source d'énergie : ce fait « prouve que l'action qui émane des conducteurs voltaïques ne peut être due à une distribution particulière de certains fluides *en repos* dans ces conducteurs, comme le sont les attractions et les répulsions électriques ordinaires. *On ne peut attribuer cette action qu'à des fluides en mouvement* dans le conducteur qu'ils parcourent, en se portant rapidement d'une extrémité de la pile à l'autre extrémité »²⁶.

La deuxième conséquence de ces rotations continues, fondamentale dans l'argumentation d'Ampère face aux théories électromagnétiques reposant sur une magnétisation des conducteurs, est, comme il l'écrit à Faraday, que « dans les autres théories, on devrait pouvoir imiter, avec des assemblages d'aimants disposés convenablement, tous les phénomènes que présentent les fils conducteurs ; on pourrait donc, en faisant agir un de ces assemblages sur un autre, produire dans celui-ci le mouvement continu toujours dans le même sens ; ce que dément l'expérience »²⁷, Ampère estime que cette impossibilité d'obtenir une rotation continue avec des aimants seuls porte un coup fatal à la théorie de Biot en particulier.

D'où la conclusion de sa lecture publique :

« C'est ainsi que de deux hypothèses servant à expliquer un certain nombre de phénomènes, celle où l'on ne peut en rendre raison qu'en s'efforçant de la faire concorder avec eux, est ordinairement démentie par d'autres phénomènes dont le temps amène successivement la découverte ; et celle, au contraire, qui n'est pour ainsi dire que *l'expression des véritables rapports des faits qu'elle explique*, se trouve confirmée chaque fois que l'expérience nous en fait connaître de nouveaux »²⁸.

La philosophie de la connaissance d'Ampère intervient là de manière sous-jacente. Les phénomènes, ou réalité profonde, nous seront toujours inaccessibles, mais les rapports entre ces phénomènes ont leurs transposés dans les rapports entre les noumènes, ici en physique entre les concepts ou les grandeurs que la théorie fait correspondre aux phénomènes. Le rôle de la théorie est de prévoir les rapports entre ces noumènes.

Ce texte est à rapprocher d'un texte que Fresnel écrivit à la même époque dans un exposé synthétique de sa théorie ondulatoire : « Le choix d'une théorie n'est pas indifférent. Son utilité ne se borne pas à

²⁶ *Journal de Physique*, t. 94, 1822, p. 65 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 242-243.

²⁷ *Correspondance*, t. II p. 590. · :

²⁸ « Exposé des nouvelles expériences... », dans *Journal de Physique*, t. 94, 1822, p. 66 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 244.

faciliter l'étude des faits en les réunissant par groupes plus ou moins nombreux, *d'après leurs rapports les plus frappants*. Un autre but non moins important d'une bonne théorie doit être de contribuer à l'avancement de la science, à la découverte des faits et *des rapports entre les classes de phénomènes les plus distinctes et en apparence les plus indépendantes les unes des autres* »²⁹.

II. LA THÉORIE DU MAGNÉTISME

1. Double hypothèse des courants préexistants et particuliers

Après avoir envisagé, en 1820, des courants coaxiaux répartis dans la masse des aimants, Ampère a adopté l'hypothèse de Fresnel sur l'existence de ces courants autour de chaque particule magnétique et non plus autour de l'axe de l'aimant³⁰. Mais il faut encore déterminer si ces courants particuliers sont *créés* lors de la magnétisation ou, s'ils existaient déjà avant celle-ci. Dans le premier cas, de tels courants

Recueil, pl. 6, fig. 17

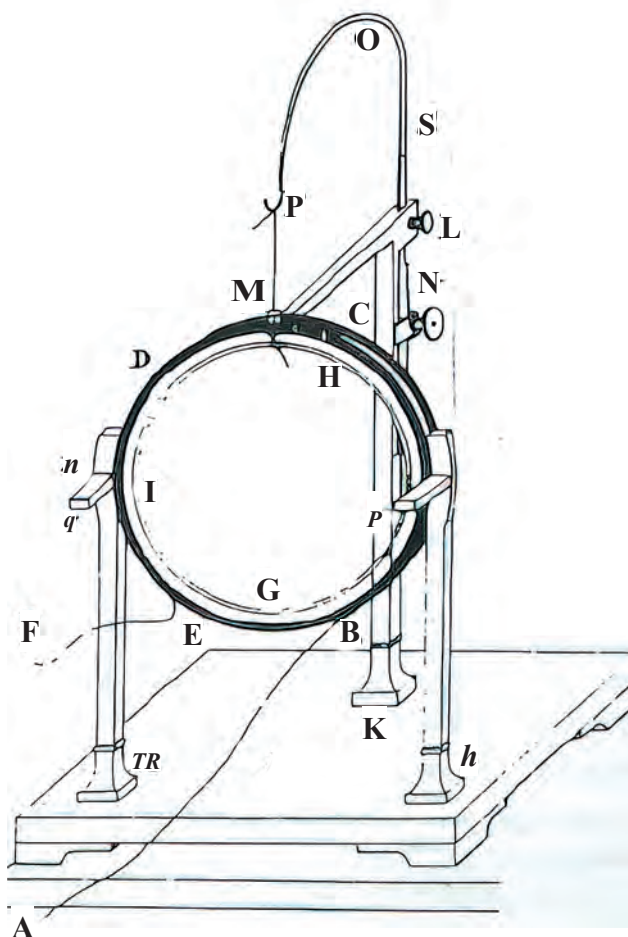


Fig. 39

²⁹ A. FRESNEL, « De la lumière » dans le « Supplément à la traduction française de la 5^e édition du *Système de Chimie* par M. Thomson », Paris, 1822, p. 3.

³⁰ Voir les deux notes de Fresnel publiées pour la première fois, dans la *Collection de Mémoires...*, t. II, p. 141-147.

devraient pouvoir être créés dans des corps conducteurs, mais non magnétiques, comme le cuivre, par des courants électriques voisins.

En juillet 1821, Ampère tente l'expérience avec un anneau de cuivre suspendu par un fil isolant à l'intérieur d'une spirale voisine parcourue par un courant électrique (fig. 39). L'existence de courants dans l'anneau de cuivre, sous l'influence de la spirale, devait être détectée par le mouvement de l'anneau lorsqu'un aimant était placé devant lui. N'observant aucun mouvement, Ampère en déduit qu'on ne peut créer de courant dans un métal par l'influence d'un courant voisin et qu'en conséquence les courants électriques situés au sein des aimants préexistent à l'aimantation ³¹.

L'absence d'action de ces courants avant l'aimantation est justifiée par une distribution aléatoire des orientations de ces circuits dont l'effet total à l'extérieur est nul. Sous l'action d'un conducteur voisin, par exemple une hélice, ces courants prennent une orientation commune. Dans un corps non magnétique, ces mêmes courants ne pourraient changer d'orientation ou du moins cette orientation des courants particuliers nécessiterait des forces magnétiques supérieures à celles connues jusqu'alors.

Le résultat négatif de cette expérience sur la création de courants par influence était donc fondamental pour la théorie magnétique d'Ampère. Cependant lorsqu'en septembre 1822, réalisée à Genève avec un aimant plus puissant, l'expérience donne un résultat positif (l'anneau de cuivre étant attiré par aimant), Ampère ne modifie pas son opinion sur la préexistence des courants particuliers. Le constat expérimental de juillet 1821 n'était donc qu'une confirmation d'une conviction théorique préétablie.

L'expérience présente encore pour lui l'intérêt de renforcer l'hypothèse des courants particuliers (ou du moins de petites dimensions) face à celle des courants coaxiaux : dans sa lettre à Van Beck, Ampère écrit :

« (Cette expérience) fixa entièrement mon opinion à cet égard, quoiqu'elle ne prove que d'une manière indirecte que les courants électriques ont lieu, dans les aimants, autour de chaque particule » ³².

En fait la préexistence des courants s'accommode aussi bien d'une hypothèse que de l'autre, le seul avantage des courants particuliers étant que leur origine peut être cherchée dans la structure de la matière à l'échelle microscopique.

Avec l'expérience de la rotation d'un aimant autour de son axe sous l'action d'un conducteur (fig. 37), Ampère croit tenir « une preuve qui (lui) semblait encore plus décisive » ³³. En effet, appliquant sa formule simplifiée de décembre 1820 aux forces s'exerçant entre les portions du conducteur vertical et les courants de l'aimant, il montre que ces forces sont nulles (et ne peuvent donc créer de rotation) si on suppose les courants centrés sur l'axe de l'aimant.

Quel que soit en effet l'élément d'un courant circulaire centré sur l'axe de l'aimant, cet élément est perpendiculaire en son milieu au plan déterminé par un élément du fil conducteur et la droite qui joint les milieux des deux éléments (fig. 40). Le cosinus de l'angle γ (voir chap. III § Trl-3) est donc nul. La force étant proportionnelle au facteur $(\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma)$ est donc nulle pour tous les couples d'éléments interagissant.

Remarquons qu'à cette date (février-mars 1822) Ampère tient encore le facteur indéterminé $\frac{n}{m}$ de sa formule pour nul. Il aurait pu d'ailleurs éviter l'utilisation de la formule en utilisant l'argument déjà étudié selon lequel l'action entre deux éléments de courants dont l'un est perpendiculaire en son milieu au plan formé par l'autre élément et la droite qui les joint est toujours nulle.

³¹ Cette expérience est décrite d'abord dans les « Notes relatives au mémoire de M. Faraday », dans *J.C.P.*, t. 18, 1821, p. 377 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 189, puis dans la « Réponse à la lettre de M. Van Beck », dans *Phys.*, t. 93, 1821, p. 448 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 213.

³² « Réponse à la lettre de M. Van Beck », dans *Journal de Physique*, t. 93, 1821, p. 447 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 213.

³³ *Journal de Physique*, t. 93, 1821, p. 453 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 219.

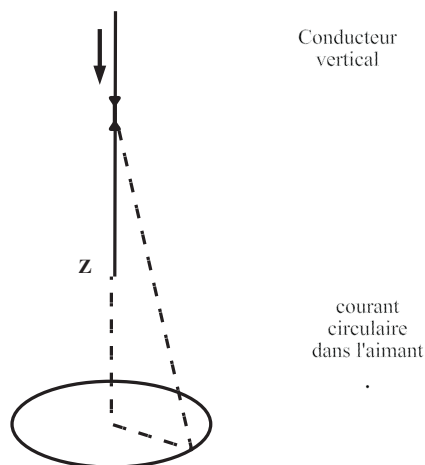


Fig. 40

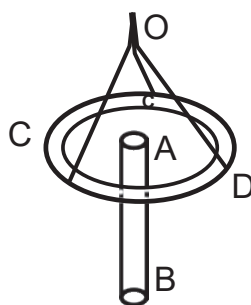
Si par contre, au lieu d'être coaxiaux, les courants sont « toujours dans des plans horizontaux, mais autour des particules de cet aimant » l'angle n'est plus toujours nul et la force est bien dans le sens prévu

Une expérience décrite sur une feuille manuscrite d'Ampère parmi ses brouillons est à rapprocher de celle-ci (fig. 41)

« Expérience décisive entre les courants moléculaires ou autour de l'axe :

Essayer le mouvement perpétuel de M. Faraday avec l'aimant ordinaire AB et l'aimant en anneau de MM. Gay-Lussac et Welter suspendu en O. Il ne peut avoir lieu dans la première hypothèse qui est la vraie, il serait possible dans la seconde » ³⁴.

En fait l'impossibilité d'obtenir une rotation continue avec 2 aimants enlevait tout caractère « décisif » à ce projet d'expérience.



Carton XI : Chem. 206 ter

Fig. 41

La démonstration tirée de la rotation de l'aimant autour de son axe perd sa valeur lorsqu'Ampère se rend compte qu'il faut attribuer cette rotation à l'action des courants dans le mercure (voir plus haut). Pour imposer sa conviction il trouve alors d'autres arguments tirés de l'aimantation elle-même, comme l'absence d'augmentation de la température ³⁵, ou d'action électromotrice dans l'acier lorsque celui-ci

³⁴ Arch., carton xi, chem. 206 ter.
³⁶ Arch., carton ix, chem. 173. .

devient magnétique. L'aimantation d'un fil d'acier, durable lorsqu'il est placé perpendiculairement au fil conducteur qui agit sur lui, ou temporaire et transversale « comme s'il était composé de petits aimants perpendiculaires à sa direction lorsqu'il lui est parallèle ». s'explique ainsi par le fait que dans la première expérience les courants particuliers circulaires sont parallèles les uns aux autres et s'attirent tandis que dans la deuxième expérience ils se repoussent et rendent la magnétisation instable.

Mais ces explications, comme celles qu'il donne pour l'aimantation par double touche et la formation de points conséquents, sont symétriques de celles qu'on peut donner dans la théorie classique de Coulomb. Ces preuves de l'existence des courants particuliers sont d'ailleurs qualifiées par Ampère lui-même en juin 1822 de « compliquées et indirectes »³⁶.

2. Liens entre les courants particuliers et la matière

Comment expliquer la présence de courants électriques autour des particules des corps magnétiques, et même plus généralement de tous les corps ?

Après son expérience sur les courants par influence, Ampère songe à rédiger un mémoire sur le magnétisme. Mais sans doute ses recherches lui parurent-elles trop spéculatives ou peut-être préféra-t-il se consacrer à la détermination du facteur indéterminé de sa formule.

Il se contenta alors de quelques indications dans sa lettre à Van Beck. Les courants particuliers trouvent leur origine dans la décomposition par les particules des corps du fluide neutre qui les entoure. Ce fluide neutre, « formé par la réunion des deux électricités »³⁷, n'intervient pas dans la théorie de Coulomb où seuls les fluides positif et négatif exercent des forces et où leur « neutralisation » ne donne naissance à aucun substrat, si ce n'est lumière et chaleur. On pourrait comparer cette conception du phénomène à celle d'une réaction matière-antimatière.

Par contre Ampère assimile plutôt cette neutralisation électrique à une neutralisation chimique qui a pour résultat un nouveau corps « neutre ». Ce fluide sans masse, ni propriétés électriques a une existence bien fragile ! Il vient à point nommé pour servir de support à la propagation des effets électrodynamiques, lumineux et caloriques et donc donner un statut à l'éther dont Fresnel étudiait à la même époque les propriétés optiques.

Le fluide neutre baignant l'espace autour des molécules, il suffit que ces molécules créent une force électromotrice, un déséquilibre électrique, pour que le fluide neutre voisin soit décomposé en fluide positif et fluide négatif.

Ampère, ayant sans doute relu l'ouvrage d'Ørsted, adopte à partir de cette époque sa conception du courant électrique : une suite de décompositions et recompositions électriques se propageant le long du conducteur.

Un courant autour d'une particule correspond donc à une suite de décompositions et de recompositions du fluide neutre qui l'entoure.

Un manuscrit de l'ébauche de mémoire rédigée à cette époque précise l'origine de la force électromotrice dans les particules magnétiques.

30 « Extrait d'une lettre de M. Ampère à M. le professeur de La Rive sur des expériences électrodynamiques », dans *Bibliothèque Universelle*, t. 20, 1822, p. 187 et *Recueil*, p. 253. Ampère est d'ailleurs contraint de faire intervenir ce que Poisson nommera en 1824 la « force coercitive » dans les aimants : « Il faut toujours supposer que les courants {dans les aimants} éprouvent quelque difficulté à changer leur direction autour des particules ; car sans cela, ils reprendraient aussitôt, par leur action mutuelle, des directions où il n'y aurait plus aucun courant repoussé par les courants voisins et où ces courants seraient par conséquent, dirigés en différents sens, et sans action au dehors ». (« Réponse à M. Van Beck », dans *Journal de Physique*, t. 93, p. 457 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 225).

37 « Réponse à la lettre de M. Van Beck », dans *Coll. Mém.*, t. II, p. 215.

Pour former une pile dans une substance magnétique, il suffit dit-il de « rangées de molécules qui se regarderaient par des pôles différents (...). Ce serait le contact des molécules élémentaires et hétérogènes formant la molécule intégrante qui donnerait naissance à l'électricité des courants (...). L'idée que M. Ampère a depuis longtemps développée et *qui fait consister les molécules des corps dans des centres de forces* se prête facilement à la production de ces courants. La rupture d'équilibre d'où résulte l'électricité serait dans ce système le défaut d'équilibre entre les forces qui constituent la molécule de l'aimant et celles qui constituent la molécule électrique »³⁸.

Une particule, ensemble de molécules, est donc comme une petite pile qui d'après le schéma d'Ampère (fig. 42) crée deux courants opposés ZAC et ZBC. Ces deux courants sont sans action sur un point P à distance finie mais si un courant extérieur agit sur la pile, cela « mettra tout le courant soit dans ZAC, soit dans ZBC, et ce courant unique, situé de même dans toutes les particules, agira sur P »³⁸.

carton XI: Chem. 206 ter

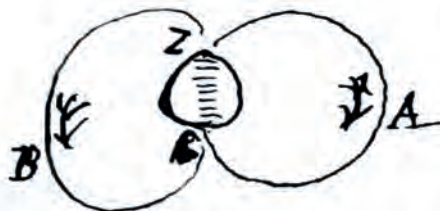


Fig. 42

Le changement d'orientation des courants particuliers qui se produit lors de l'aimantation ne peut être dû à un mouvement des molécules elles-mêmes, « car cette oscillation des molécules des aimants devrait changer la cristallisation et cependant l'aimantation ne produit rien de semblable ». Cela ne peut donc être que les courants qui « en glissant sur la surface des molécules » et quoique passant par les mêmes points électromoteurs se rapprocheront de la direction des courants de l'aimant influençant.

Cependant conclut Ampère : « Cette explication (...) n'est pas la seule à (se) présenter, il me semble même plus vrai de concevoir que *chaque molécule possède une infinité de courants dans tous les sens* produits par les différentes séries de points électromoteurs, et que l'aimantation qui les soumet tous à l'action de courants parallèles favorise davantage ceux qui leurs sont parallèles *en accélérant leur mouvement* tandis que les autres courants moléculaires éprouveront moins d'accélération par la direction non parallèle »³⁸.

Dans les corps non magnétiques les forces électro-motrices à l'origine des courants particuliers seraient plus fortes et les courants extérieurs créés par les piles usuelles auraient une action trop faible pour déplacer les courants correspondants.

Les courants particuliers du fer et de l'acier peuvent encore être orientés sous l'action d'un courant voltaïque non plus extérieur mais intérieur au corps lui-même. Ainsi lorsqu'un fil de fer est parcouru par un courant électrique, explique Ampère dans une note publiée à la suite d'une lettre que lui avait adressée le physicien J.M. Van der Heyden³⁹, le courant le long du fil est, par raison de symétrie, sans action sur les courants particuliers centrés sur l'axe du fil. Mais les autres courants particuliers tendront à se placer dans des plans passant par l'axe, formant ainsi des solénoïdes toriques sans action à l'extérieur.

³⁸ Arch. As. Sc., carton XI, chem. 206 ter.

³⁹ *Journal de Physique*, t. 95, 1822, p. 70 (le texte d'Ampère n'est pas signalé au sommaire).

Que le courant parcourt un fil de fer ou un fil de cuivre, les effets sont donc les mêmes. Mais lorsque le fil de fer est en outre en présence d'un aimant, l'aimant agit à la fois sur le courant dû à la pile et sur les courants particuliers et les effets sont alors différents. Ainsi s'explique la différence de comportement entre une hélice d'acier et une hélice de cuivre parcourues par un courant en face d'un aimant.

Toutefois, ce ne sont là que des spéculations et rien ne permet de départager entre, par exemple, l'hypothèse du changement d'orientation des courants particuliers lors de l'aimantation et celle de l'accélération d'une partie seulement d'entre eux ⁴⁰.

3. Disposition des courants dans les aimants

C'est le mémoire de Faraday sur les rotations qui suggère à Ampère que les courants particuliers ne peuvent être tous perpendiculaires à l'axe de l'aimant. En effet, si Faraday conclut de sa comparaison des propriétés d'un aimant cylindrique et d'une hélice que les propriétés de l'un et l'autre sont dues à une même cause, il insiste également sur une différence importante : dans l'hélice les pôles sont exactement aux extrémités tandis que dans l'aimant ils sont situés à une certaine distance de ses extrémités ⁴¹.

Pour expliquer cette différence, Ampère avait d'abord pensé que les courants étaient plus intenses ou plus nombreux au centre de l'aimant que près de ses extrémités ⁴². Mais une expérience de G. de La Rive concorde avec une autre explication ⁴³.

En effet G. de La Rive avait été étonné en voyant un anneau flotteur parcouru par un courant (fig. 43) et placé latéralement contre un aimant se déplacer le long de l'aimant en y adhérant toujours alors que « suivant la théorie (de M. Ampère), l'un des côtés devrait être attiré et l'autre repoussé » ⁴⁴.

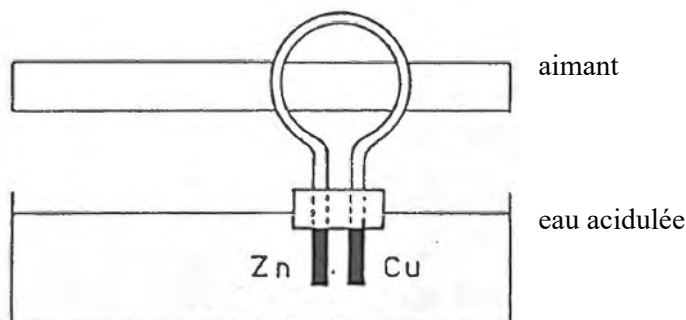


Fig. 43

⁴⁰ C'est à cette hypothèse de l'orientation que se rallie finalement Ampère dans la réponse à Van Beck : « En sorte que la seule différence qui se trouve à cet égard entre les corps susceptibles d'aimantation et ceux qui ne le sont pas consisterait dans la propriété qu'auraient les particules des premiers de *laisser déplacer les courants électriques qui circulent autour d'elles*, tandis que dans les autres corps les courants excités autour de chaque particule ne seraient pas susceptibles de changer de direction, ou ne le pourraient que par une force supérieure à celles qui ont été exercées jusqu'à présent sur ces courants. » (*Journal de Physique*, t. 93, p. 449 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 215).

⁴¹ *A.C.P.*, t. J 8, 1821, p. 365 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 179. }

⁴² L'hypothèse de courants plus intenses au milieu de l'aimant est celle de Fresnel dans sa deuxième note sur l'hypothèse des courants particuliers (*Coll. Mém.*, t. II, p. 146). Elle est donnée par Ampère dans les *M.A.R.S.*, 1821-1822 (volume édité en 1826), p. 44, dans les « Notes relatives au Mémoire de M. Faraday » (*A.C.P.*, t. 18, p. 376 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 188) et dans l'« Extrait d'une lettre de M. Ampère à M. le professeur de La Rive » (*Bibliothèque Universelle*, t. 20, p. 191 et *Recueil*, p. 258).

⁴³ Le 6 juillet 1822, Ampère écrit au baron Maurice : « C'est l'observation de M. Faraday svr ce que les pôles des hélices sont exactement à leurs extrémités, et non pas ceux des aimants, qui m'a donné cette idée de l'inclinaison des courants des particules qui ne sont pas dans l'axe. Mais il est vrai que c'est l'expérience de M. de La Rive qui m'a confirmé dans cette vue sur la situation des courants de l'aimant ». (*Correspondance*, t. II, p. 927).

⁴⁴ « Notice sur quelques expériences électromagnétiques », dans *Coll. Mém.*, t. II, p. t 52 et *Bibliothèque Universelle*, t. 18, 1821, p. 276. Ampère commente l'expérience dans sa lettre à Van Beck. (*Journal de Physique*, t. 93, p. 458 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 226).

Ampère est alors conduit à étudier l'action d'un aimant sur un conducteur perpendiculaire voisin (fig. 44). Le conducteur E (dirigé d'avant en arrière) ne subit pas d'action latérale de la part de l'ensemble des courants On et Om de l'aimant ($On = Om$), mais par contre, il est attiré par la partie mD jusqu'à ce qu'il atteigne le milieu de l'aimant. Cet effet latéral est donc d'autant plus grand que le courant E est

-Recueil, pl. 6, fig. 24

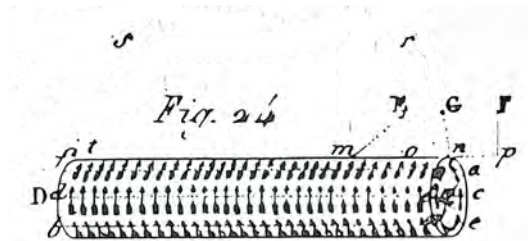


Fig. 44

plus éloigné du milieu de l'aimant. Si le conducteur E était parcouru par un courant d'arrière en avant, il serait bien sûr repoussé par la même partie mD des courants de l'aimant. Une petite spire circulaire placée en E dans le plan perpendiculaire à l'axe de l'aimant devrait donc s'incliner par rapport à l'axe de cet aimant, la partie supérieure étant, comme on vient de le voir, attirée et la partie inférieure repoussée par l'extrémité D de l'aimant. C'est ce qui ne peut manquer de se passer dans l'aimant lui-même : les courants centrés le long de l'axe « ne pourront qu'être dans des plans perpendiculaires à cet axe »⁴⁵, mais les courants loin de l'axe s'inclineront par rapport à celui-ci et ce, d'autant plus qu'ils seront plus éloignés du centre de l'aimant (fig. 45).

Recueil, pl. 6, fig. 25

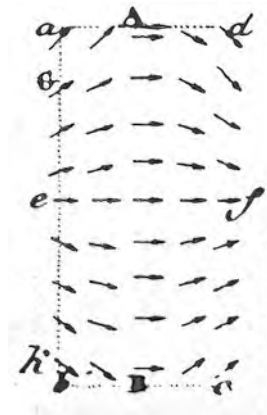


Fig. 45

De cette disposition des courants particuliers résulte que les pôles sont situés à une certaine distance des extrémités comme l'avait souligné Faraday.

Ainsi s'explique également l'expérience de de La Rive : la branche de l'anneau la plus voisine du milieu de l'aimant est attirée par lui mais l'autre est repoussée avec une force supérieure.

46 « Extrait d'une lettre de M. Ampère au Professeur de La Rive », dans *Bibliothèque Universelle*, t. 20, 1822, p. 190 et *Recueil*, p. 257.

A propos de cette inclinaison des courants dans les aimants, Ampère écrit le 12 avril 1822 au flamand S. Van der Eyck : « J'ai depuis longtemps cherché à exprimer cette inclinaison pour chaque particule d'après sa distance à l'axe de l'aimant et l'endroit de la longueur de cet axe où la particule répond perpendiculairement. Quoique j'ai aisément déterminé le sens de cette inclinaison et les résultats généraux parfaitement conformes aux expériences qu'elle doit avoir dans la production des phénomènes, je n'ai encore rien publié à ce sujet faute de temps, et parce que les calculs que M. Savary et moi avions essayés pour parvenir à une détermination suffisante de la valeur mathématique de l'inclinaison, ne nous en ont pas encore donné les résultats que nous espérions »⁴⁶.

Quelques mois plus tard, il expose à Faraday un nouvel argument en faveur de cette idée de l'inclinaison des courants : « Cette inclinaison des courants des particules des aimants ne me sert pas seulement à rendre raison de la différence que vous avez remarquée entre la situation des pôles d'un aimant et ceux d'une hélice, mais encore à expliquer plusieurs phénomènes qu'offrent les aimants et, entre autres, la disposition que prend la limaille de fer, soit autour, soit sur la surface d'un aimant, et en particulier sur les arêtes de ses bases »⁴⁷.

A ce stade de ses recherches, Ampère doit cependant reconnaître que la plupart des « preuves » à l'appui de sa théorie du magnétisme peuvent recevoir une explication parallèle dans la théorie des fluides de Coulomb. Le seul argument de poids est l'impossibilité d'obtenir un mouvement de rotation continue avec des aimants seulement, ce que prévoit sa théorie. En outre, il voit un « motif puissant en sa faveur » dans le fait qu'« on soit en quelque sorte obligé de traduire (son) explication dans le langage de l'ancienne théorie pour pouvoir y rendre raison des mêmes circonstances »⁴⁸.

III. LA DÉTERMINATION COMPLÈTE DE LA FORMULE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

1. La découverte d'un troisième « cas d'équilibre »

En février-mars 1822, Ampère attribue encore au facteur $\frac{n}{m}$ (ou k) de sa formule une valeur nulle. Cette formule, déterminée en décembre 1820, donne la force s'exerçant entre deux éléments de courants ds et ds' parcourus par des courants d'intensité i et i' en fonction de leur distance et de trois angles (α, β, γ) , α et β étant les angles entre les éléments et la droite qui les joint et γ l'angle entre les deux plans formés chacun par cette droite et un des éléments (fig. 22 p. 84) :

$$\frac{i i' ds ds' (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + k \cos \alpha \cos \beta)}{r^n} \quad (1)$$

A deux reprises au cours de ses premières recherches, Ampère avait prévu des mesures absolues destinées à vérifier numériquement cette formule : en octobre 1820 avec un courant mobile soumis à un conducteur fixe et en novembre 1820 avec un aimant mobile. Mais dans ce dernier cas, il avait été devancé par Biot.

Cependant, il ne désespérait pas de mesurer la force entre deux conducteurs pour en comparer la valeur avec celle déduite de la formule. Une méthode simple pour cela est de mesurer puis calculer la période !

46 *Correspondance*, t. II, p. 579.

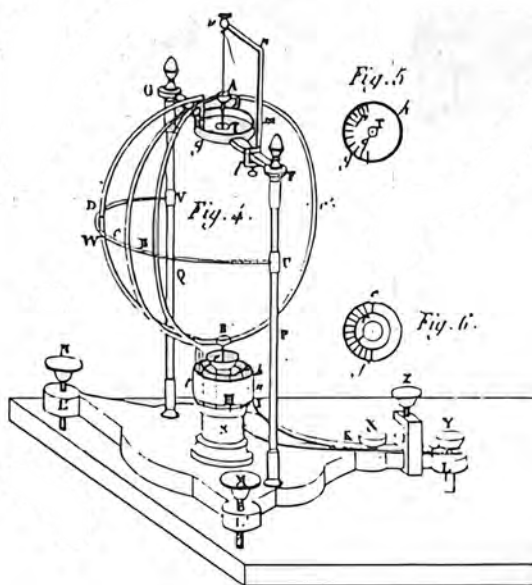
47 *Correspondance*, t. II, p. 588.

48 *Correspondance*, t. II, p. 589.

49 «Notes sur les expériences électro-magnétiques de MM. Ørsted, Ampère et Arago, relatives à l'identité de l'aimant avec l'électricité », dans

des oscillations d'un conducteur mobile soumis à l'action d'un conducteur fixe, « ce qui ne peut se faire que par approximation (...) puisque l'on tombe sur des intégrations par quadratures qui ne peuvent être obtenues sous forme finie »⁵⁰. La forme la plus simple de conducteur mobile, tant du point de vue du calcul que de la fabrication matérielle, semble être à Ampère la demi-circonférence.

Il est facile de soustraire cette demi-circonférence à l'action de la terre en y adjoignant une autre demi-circonférence parcourue par un courant opposé (fig. 46). Ainsi le cercle AcBc', suspendu par un fil de soie, est mobile sous l'action des deux demi-cercles fixes ADB et AEB, dont l'écartement peu d'ailleurs être modifié.



Recueil, pl. 10, fig. 4

Fig. 46

Ce dispositif, auquel Ampère consacre de longues pages de description et de mode d'utilisation dans les « Notes » dont il fait suivre son « Exposé sommaire des nouvelles expériences électromagnétiques faites par différents physiciens depuis le mois de mars 1821 » (lu à la séance publique de l'Académie du 8 avril 1822) dans le *Recueil d'observations électro-dynamiques*, restera toutefois longtemps au stade d'« expérience théorique ».

En effet dans le « (Second mémoire) : Sur la détermination de la formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs voltaïques », lu le 10 juin 1822, il déclare « Je décrirai ailleurs cet appareil que je n'ai point fait encore exécuter »⁵¹.

Il faut dire que peu après avoir conçu ce procédé de mesures absolues, il trouva un troisième cas d'équilibre qui lui permit de déterminer le coefficient k , et il reconnaît alors : « Je négligeai de faire des expériences pour résoudre une question dont j'attendais d'ailleurs une solution complète du travail que venait d'entreprendre M. Savary, sur l'application de ma formule au calcul des phénomènes électro-dynamiques »⁵².

50 « Notes sur l'Exposé des nouvelles expériences ... », dans *Recueil*, p. 223 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 257.

51 *A.C.P.*, t. 20, 1822, p. 401 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 272. Le 12 avril 1822, c'est-à-dire pendant qu'il travaille à ce mémoire Ampère écrit à S. Van der Eyck : « J'ai si peu de temps disponible que je n'ai pas la possibilité de faire la plus grande partie des expériences dont j'aurais besoin » (*Correspondance*, t. II, p. 579). L'appareil fut cependant construit ultérieurement car il est présenté à l'Académie des Sciences le 16 juin 1823. 112

52 « Notes sur l'Exposé des nouvelles expériences ... », dans *Recueil*, p. 235 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 267.

Quel est ce troisième cas d'équilibre ? Rappelons que le premier est la nullité d'action de deux conducteurs très voisins parcourus par des courants opposés et le deuxième l'égalité d'action de deux conducteurs parallèles dont l'un a seulement subi des déformations du premier ordre par rapport à la distance qui les sépare (expérience du « conducteur sinueux »), en un point à égale distance de ces conducteurs.

Ce troisième cas est une conséquence fortuite des expériences de rotations continues qu'Ampère réalise après avoir connu le mémoire de Faraday. En cherchant à obtenir la rotation d'un aimant autour de son axe, il faisait agir des aimants « sur les conducteurs mobiles dont (il) s'était servi jusqu'alors dans toutes ses expériences, et dont les deux extrémités se trouvaient dans l'axe de rotation ; (il) parvint bientôt à ce résultat général, que tant que cette circonstance a lieu dans un conducteur dont toutes les parties sont liées invariablement entre elles, le mouvement de rotation continu est impossible »⁵³.

Ainsi en particulier le rectangle mobile, déjà utilisé plusieurs fois, ne tournait pas sous l'action de l'aimant alors que le rectangle dont le côté inférieur était remplacé par une couronne (fig. 33) tournait. L'un avait ses deux extrémités sur l'axe de rotation et l'autre pas.

Pour en déduire une relation entre courants seulement, il suffisait de remplacer l'aimant par un conducteur spiral. Ainsi peut alors s'énoncer la conclusion : « Un circuit fermé circulaire ne peut jamais produire de mouvement continu toujours dans le même sens, en agissant sur un conducteur mobile d'une forme quelconque qui part d'un point de l'axe élevé perpendiculairement sur le plan de ce circuit par le centre du cercle dont il forme la circonférence, et qui se termine à un autre point du même axe, lorsque le conducteur mobile ne peut se mouvoir qu'en tournant autour de cet axe »⁵⁴.

Ce troisième cas d'équilibre n'est donc pas conçu a priori comme les deux premiers, il ne résulte pas non plus d'un projet de mesures ; il surgit comme la constatation d'un échec dans des recherches expérimentales menées dans un tout autre but. C'est cependant à partir du moment où Ampère a tiré profit de ce résultat négatif qu'il déclare abandonner définitivement tout projet de mesure absolue de force électromagnétique. Il érige alors cette utilisation des « cas d'équilibre », ou « méthodes de zéro », en méthode expérimentale sur laquelle il peut faire a posteriori des commentaires épistémologiques. Au début du « Second mémoire » lu le 10 juin 1822, il oppose cette méthode qui consiste à partir de la formule la plus générale possible et en préciser la forme à l'aide du nombre nécessaire de conditions fixées par des cas d'équilibre à la méthode directe qu'il avait envisagée en octobre 1820 consistant à faire une hypothèse sur la formule élémentaire, comparer avec le résultat des mesures des forces et rectifier l'hypothèse en conséquence, ce « jusqu'à ce que les résultats du calcul s'accordent avec ceux de l'observation »⁵⁵.

Bien qu'entre 1822 et 1826 Ampère imagine encore quelques expériences destinées à effectuer des mesures absolues de forces électrodynamiques, c'est un changement de stratégie qu'il opère en juin 1822. La comparaison entre les deux méthodes est reprise dans les premières pages de la *Théorie des phénomènes électro-dynamiques* où il souligne l'avantage de ne pas avoir à faire d'hypothèses sur l'origine ou la nature de la force élémentaire.

2. La traduction mathématique de la condition d'équilibre

De l'absence d'action d'un cercle horizontal sur le rectangle vertical, Ampère conclut un peu rapidement à l'absence d'action d'un arc infiniment petit quelconque de ce cercle. Quelques mois plus tard, lors de

53 « Notes sur l'Exposé des nouvelles expériences... », dans *Recueil*, p. 235, et *Coll. Mem.*, t. II, p. 268.

54 « Sur la détermination de la formule... », dans *A4.C.P.*, t. 20, 1822, p. 414 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 283.

55 *A.C.P.*, t. 20, 1822, p. 399 et *Coll. Mem.*, t. II p. 27

son séjour à Genève en septembre 1822, il montre expérimentalement qu'un demi-cercle n'a pas d'action, mais cela ne prouve pas encore la propriété précédente, relative à un élément infiniment petit ⁵⁶.

Pour traduire analytiquement cette nullité d'action d'un arc de cercle sur un circuit quelconque dont les extrémités sont sur l'axe du cercle, Ampère faut d'abord subir une transformation à l'expression précédente de la formule (1) qui devient :

$$\frac{-i i' r^{1-n-k}}{1+k} \frac{\partial^2 (r^{1+k})}{\partial s \partial s'} ds ds'$$

Cette nouvelle forme présente le grand intérêt de séparer les intégrations relatives à chaque circuit. Ainsi il est possible de calculer le moment de la force s'exerçant entre un élément de cercle horizontal ds' et un élément quelconque ds . La condition à traduire est que l'intégrale de ce moment sur le circuit (C) auquel appartient l'élément ds est nulle si ce circuit a ses extrémités sur l'axe, c'est-à-dire que ce moment doit être une différentielle exacte par rapport à la distance de l'élément ds à l'axe.

Le calcul donne $2k+n = 1$ d'où la valeur $k = \frac{1-n}{2}$ Ampère en conclut : « Quand $n = 2$, on a $k = -\frac{1}{2}$, mais quelle que soit la force des analogies qui portent à penser que n est, en effet, égal à 2, on n'en a aucune preuve déduite directement de l'expérience » ⁵⁷. Ainsi il reste encore un facteur indéterminé dans la formule, bien qu'il soit peu indéterminé dans l'esprit d'Ampère.

Le facteur k a une signification physique bien précise. La force s'exerçant entre deux éléments parallèles ad et $a'd'$ est $\frac{i i' ds ds'}{r^n}$ ($\alpha = 90^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $\gamma = 0$) (fig. 47) et celle entre les deux éléments colinéaires

a et $a''' d'''$ placés à la même distance est $k \frac{i i' ds ds'}{r^n}$ ($\alpha = 0$, $\beta = 0$, $\gamma = 0$). Le facteur k est donc le rapport entre ces deux forces ; comme il est négatif, si la première est une attraction, la deuxième est une répulsion et cela implique, comme l'a souligné H. Grassmann que la force s'annule pour une position intermédiaire $a'' d''$ ⁵⁸.

Recueil, pl. 6, fig. 18

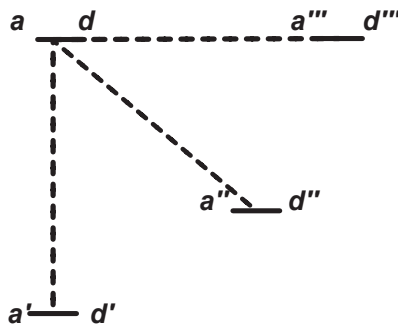


Fig. 47

⁵⁶ C'est de la valeur de k qu'il déduit réciproquement la nullité d'action d'un arc de cercle. « D'après la valeur de ce coefficient (k) ainsi déterminé, la même chose devait aussi avoir lieu en substituant au conducteur fixe, formant une circonférence entière plusieurs fois redoublée, un conducteur fixe qui ne formât qu'un arc de cercle; on en a construit un à Genève, en demi-circonférence également redoublée, et le conducteur mobile est resté dans toutes les positions où on l'a mis » (Mémoire lu à l'Académie Royale des Sciences le 16 septembre 1822, publié pour la première fois dans *Coll. Mem.* t.II, p. 332). Voir plus loin (p. 132) le jugement porté ultérieurement par Ampère sur l'utilisation abusive de cette expérience. Voir aussi sur la même expérience la note 1, p. 312-313 du *Recueil*.

⁵⁷ *A.C.P.*, t. 20, p. 418, et *Coll. Mem.*, t. II, p. 288.

⁵⁸ Ce passage d'une répulsion à une attraction pour une valeur d'un paramètre qui ne marque aucune discontinuité de fait était pour Grassmann un argument contre la théorie d'Ampère (Voir R.A.R. TRICKER, *Early Electrodynamics*, 1965 p. 100

Pour mesurer l'intensité d'un courant quelconque, Ampère propose de comparer la force exercée par ce courant sur un conducteur mobile à celle exercée par un courant de référence. Toutefois ceci était tout théorique puisqu'il n'existait pas alors de tel courant de référence. Il faut cependant souligner qu'il ne propose pas d'utiliser le procédé de 1820, à savoir le « galvanomètre » (en fait une simple boussole placée sous le courant à mesurer).

Quinze jours plus tard, Ampère lit une « Note additionnelle » à ce Second mémoire où il fait deux remarques importantes :

- la force exercée par un circuit fermé quelconque sur un élément de courant lui est toujours perpendiculaire (ce qui ne serait pas le cas si le circuit était ouvert). En conséquence la force exercée par un aimant, assemblage de circuits fermés, est toujours perpendiculaire à l'élément de courant.

- k étant négatif, la force entre deux éléments colinéaires est une répulsion :

« J'en tirais cette conclusion, écrit-il, que toutes les parties d'un même courant rectiligne se repoussent mutuellement »⁵⁹, fait qui sera vérifié expérimentalement à Genève en septembre de la même année.

Cette période de novembre 1821 à juin 1822 marque donc un progrès important dans la théorie d'Ampère : il a à sa disposition une formule qu'il estime définitive et qui lui permet de calculer toutes les actions entre courants et aimants. Comme il l'écrit alors à de La Rive, « ce résultat ramène enfin toutes les questions relatives à l'action de deux conducteurs voltaïques de quelque forme et de quelque grandeur qu'ils soient, à *de simples questions de calcul intégral* »⁶⁰.

Cependant, bien que se déclarant « accablé d'ouvrage au-delà de toute expression », il n'en oublie pas pour cela son « tableau psychologique » : il demande à son ami Bredin le 2 avril 1822 : « Je t'en prie, examine quels sont les mots du tableau auxquels tu n'attaches pas encore une idée bien précise ; fais m'en une petite liste dans ta première lettre pour que je te donne de nouveaux détails sur le groupe de pensées qu'ils représentent pour moi »⁶¹.

Il travaille également à la chimie et voudrait décrire à Roux-Bordier son « travail sur les formes et les arrangements des atomes, dont (il) a publié une esquisse, il y a six ans, dans les *Annales de Chimie* et dans celles des Mines, mais qui, tout changé et étendu à une infinité de nouvelles combinaisons, fait à présent prévoir d'avance, d'après l'arrangement des atomes dans les particules des corps simples, les proportions de combinaisons dans tous les corps composés »⁶². L'immense quantité de dessins de polyèdres associés à des combinaisons chimiques dans les brouillons d'Ampère tout au long de sa vie témoigne de son profond désir de parvenir à mathématiser la chimie grâce à la géométrie.

59 *A.C.P.*, t. 20, p. 420 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 288.

60 « Extrait d'une lettre de M. Ampère au professeur de La Rive », dans *Bibliothèque Universelle*, t. 20, p. 188 et *Recueil*, p. 255. Cette conviction d'avoir achevé l'étape fondamentale de la mathématisation de la théorie est exposée par Ampère dans sa lettre à Faraday du 10 juillet 1822 : « La valeur numérique du coefficient du second terme de la formule que j'ai donnée en 1820 pour exprimer l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de courants électriques (étant connue), cette formule se trouve ainsi complètement déterminée. J'en ai fait déjà plusieurs applications et je travaille tous les jours à en faire de nouvelles. J'espère arriver à en déduire les valeurs des forces, non seulement (dans le cas de l'action entre deux conducteurs, mais encore dans celui de l'action entre un conducteur et un aimant ou entre deux aimants). *C'est alors que toutes les difficultés qui peuvent rester encore dans l'explication des phénomènes d'après ma théorie, disparaîtront entièrement* ; mais ce que j'ai déjà déduit de cette formule ainsi déterminée suffit pour appuyer cette théorie sur une preuve directe ». (*Correspondance*, t. II, p. 590).

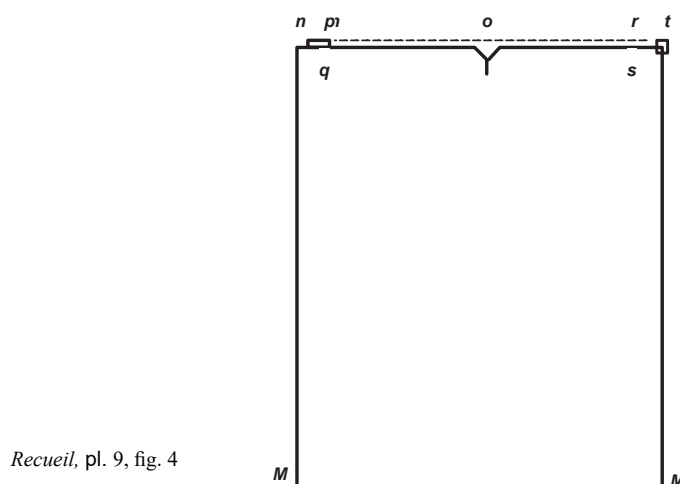
61 *Correspondance*, t. II, p. 578.

62 *Correspondance*, t. II, p. 595.

IV. LES EXPÉRIENCES DE GENÈVE (SEPTEMBRE 1822)

1. Action magnétique de la terre

C'est une lettre de G. de La Rive à Arago, parue dans le tome XX des *Annales de Chimie et de Physique*, qui incite Ampère à étudier à nouveau l'action de la terre sur les courants, action dont il avait donné les principales règles dans son mémoire du 30 octobre 1820. Dans cette lettre le professeur suisse décrit une expérience qu'il croit contraire à la théorie d'Ampère dont il affirme cependant qu'« elle explique de manière satisfaisante un grand nombre de phénomènes »⁶³. Cette expérience consiste à montrer qu'un rectangle parcouru par un courant et mobile autour d'un axe vertical s'oriente encore sous l'action de la terre quand on supprime son côté inférieur (fig. 48). Or d'après de La Rive, Ampère aurait justifié l'orientation du rectangle complet par l'action du courant de la terre sur ce même côté inférieur parce que celui-ci est plus proche de la surface terrestre.



Recueil, pl. 9, fig. 4

Fig. 48

Pour Ampère, si de La Rive a pu voir là une contradiction avec sa théorie c'est parce qu'absorbé par ses calculs relatifs à la détermination de k , il n'a pas eu le temps de rédiger un travail sur l'action de la terre montrant que celle-ci agit dans tous les cas comme un courant allant de l'Est à l'Ouest dans l'équateur magnétique du globe. Aussitôt d'ailleurs il écrit à M.A. Pictet et à Faraday de longues lettres sur ce sujet⁶⁴.

Ainsi un conducteur horizontal d'Ouest en Est est attiré au Sud par ce courant terrestre tandis qu'un conducteur vertical descendant « tend à tourner en rétrogradant de l'Ouest à l'Est » et qu'un courant ascendant tend à se déplacer vers l'Ouest. Dans l'appareil de G. de La Rive, ce sont les deux branches verticales du rectangle qui tendent à le faire tourner en sens contraire et déterminent sa position d'équilibre dans le plan Est-Ouest. Les branches horizontales étant sans action, il était prévisible qu'en supprimer une n'empêche pas le cadre de s'orienter dans le même sens.

⁶³ « Lettre à M. Arago, sur de nouvelles expériences relatives aux actions des courants galvaniques », dans *A.C.P.*, t. 20, p. 269 et *Coll. Mem.*, t. II, p. 300.

⁶⁴ *Correspondance*, t. II, p. 583 et 591,

Cependant Ampère aimerait convaincre ses interlocuteurs genevois avec des expériences plutôt qu'avec des mots. Sa tournée d'inspection d'août 1822 se déroulant dans le Sud-Est de la France, il pourrait en profiter pour passer quelques jours à Genève. Mais il lui faudrait pouvoir y disposer de l'appareil électrodynamique qu'il a conçu pour ses expériences : « Si l'on désire à Genève connaître à fond l'état de la question, écrit-il à un de ses correspondants genevois, il faudrait s'y procurer l'appareil que M. Pixii vient de construire pour moi et que je l'ai autorisé à céder à ceux qui pourraient le désirer, à la charge de m'en faire un pareil. Il est également propre pour vérifier les faits connus et pour faire de nouvelles recherches. J'y ai ajouté de nouvelles dispositions pour les actions produites par le globe terrestre et pour l'expérience qui me sert à déterminer le nombre k . Il coûte 400 francs. Si je savais de le trouver à Genève, j'y irais infailliblement au mois d'août prochain et toutes les questions seraient bientôt décidées par les expériences qu'il me servirait à faire avec les savants de cette ville à laquelle ceux qui cultivent les sciences doivent tant de reconnaissance »⁶⁵.

Pictet ou G. de La Rive empruntèrent en effet ce coûteux appareil avec lequel Ampère et eux étudièrent en détail l'action de la terre sur les conducteurs. Ces expériences ainsi que celle de la création de courants par influence et celle de la répulsion des parties d'un même conducteur sont consignées par le fils de G. de La Rive, Auguste, dans un mémoire lu devant Ampère à la Société de Physique et d'Histoire naturelle de Genève, le 4 septembre 1822, et commentées par ce dernier dans un mémoire lu à l'Académie des Sciences le 16 septembre 1822⁶⁶.

Après avoir rappelé l'explication que nous lui avons vu envoyer à Pictet et Faraday, à savoir que toute action magnétique de la terre est due à un courant d'Est en Ouest le long de l'équateur, Ampère en vérifie l'application avec A. de La Rive à tous les cas de conducteurs mobiles horizontaux ou verticaux.

Auguste de La Rive part de l'expérience de son père pour suggérer que « l'existence de toutes les portions du rectangle n'étaient pas nécessaires pour qu'il se dirigeât, et que par conséquent, il devait y avoir des parties de l'appareil qui, étant indispensables, produisaient l'effet obtenu et d'autres qui n'y contribuaient point. Pour reconnaître les unes des autres, (il) continua d'enlever au rectangle successivement ses côtés les uns après les autres »⁶⁷.

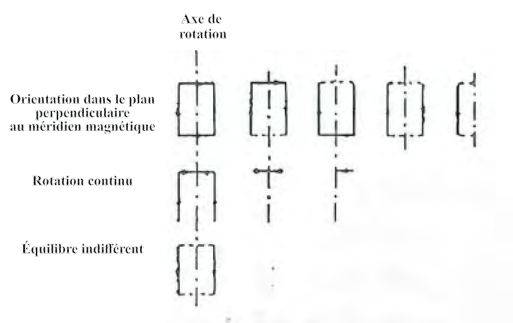


Fig. 49

Après ce travail d'analyse (fig. 49) il reconnaît que la rotation continue est due aux courants horizontaux opposés dans la partie supérieure du fer à cheval, tandis que l'orientation dans un plan fixe est due aux deux courants verticaux opposés. Sans qu'il en soit tiré de conclusion générale, ces expériences sont

⁶⁵ *Correspondance*, t. II, p. 928.

⁶⁶ Le mémoire d'A. DE LA RIVE a été publié dans la *Bibliothèque Universelle*, t. 21, p. 29-48 et dans les *A.C.P.*, t. 21, p. 24-48. Ampère fait une Addition à ce Mémoire dans les *A.C.P.*, t. 21, p. 48-53 et en outre une préface dans le *Recueil* p. 259-262. Le mémoire d'Ampère lu le 16 septembre 1822 a donné lieu à un « Extrait » publié dans le *Bulletin des Sciences de la Société Philomatique*, 1822, p. 145 et 147 (reproduit dans le *Recueil*). La *Collection de Mémoires...* reproduit un texte des Archives de l'Académie (*Coll. Mém.*, t. II, p. 329-337). Voir aussi les deux lettres d'Ampère à A. de La Rive du 11 octobre 1822 (*Correspondance*, t. II, p. 603-620) et du 26 octobre 1822 (*Ibid.*, p. 620-621).

⁶⁷ « Mémoire sur l'action qu'exerce le globe terrestre sur une portion mobile de circuit voltaïque », dans *A.C.P.*, t. 21, p. 29 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 312.

justifiées par Ampère grâce à la propriété déjà utilisée selon laquelle deux portions de courants sur deux côtés d'un angle droit s'attirent quand elles s'approchent ou s'éloignent toutes deux du sommet et se repoussent quand l'une s'en approche et l'autre s'en éloigne. Il donne de cette propriété, pour la première fois d'ailleurs, une démonstration en décomposant chaque portion de courant en deux éléments perpendiculaires (fig. 50).

Recueil, pl. 9, fig. 8

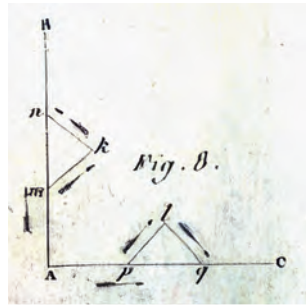


Fig. 50

Revenu à Paris, Ampère s'attache à montrer expérimentalement qu'un conducteur très grand, jouant le rôle du courant terrestre, agit bien comme il l'avait prévu sur les conducteurs mobiles.

C'est à la suite des expériences faites avec de La Rive qu'il s'aperçut en outre de l'erreur qu'il avait commise dans son mémoire sur les rotations continues :

« Ce n'est qu'en voyant ces expériences que j'ai reconnu que j'avais eu tort de comparer l'action électrodynamique terrestre à celle du conducteur fixe spiral lorsqu'elle s'exerce sur un conducteur mobile vertical »⁶⁸. Cette erreur était encore une trace de la préférence d'Ampère à manier (parfois un peu rapidement) des raisonnements globaux plutôt qu'à se livrer à une analyse de détail des phénomènes comme le fait A. de La Rive.

2. Répulsion des parties d'un même conducteur

Nous avons vu que le 24 juin 1822, Ampère avait annoncé comme conséquence de sa formule que deux éléments d'un même courant se repoussent. L'expérience est tentée et réussie à Genève avec l'appareil représenté fig. 51: le conducteur *rqpn* flottant à la surface du mercure et recouvert d'un isolant s'éloigne des points de contact *s* et *m* lorsque le circuit est fermé entre ces deux points. Cette expérience s'explique en langage moderne par le fait qu'un circuit déformable prend la forme lui donnant la surface maximale compatible avec les liaisons qui lui sont imposées afin d'être traversé par le flux maximum de la part du champ magnétique terrestre et de son propre champ induit.

Recueil, pl. 9, fig. 12

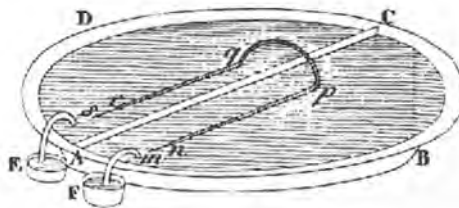


Fig. 51

⁶⁸ *Recueil*, p. 261, et *Coll. Mém.*, t. II, p. 307. Voir note 16, p. 180.

Ampère accordait une grande importance à cette expérience, ainsi écrit-il le 24 septembre : « *Cet accord de l'expérience avec un résultat annoncé d'avance est une grande preuve en faveur de ces formules* », et plus tard en 1825 à Faraday : « Je ne sais si cette expérience, qui me paraît une des plus importantes et en quelque sorte le fait fondamental de l'électro-dynamique, a été répétée en Angleterre »⁶⁹.

On peut d'ailleurs souligner que c'est une des seules expériences d'Ampère qui figure dans des cours de physique contemporains.

3. Création de courants par influence

L'expérience de juillet 1821 sur l'essai de création de courants par influence (voir S II-I) est reprise à Genève avec le même dispositif (fig. 39) mais en utilisant un aimant très puissant. Ampère et de La Rive observent alors un mouvement de l'anneau de cuivre suspendu à l'intérieur de la spirale parcourue par un courant lorsqu'on présente devant lui un pôle magnétique : « Le circuit fermé (l'anneau) placé sous l'influence du courant électrique redoublé, mais sans aucune communication avec lui a été attiré et repoussé alternativement par l'aimant » écrit simplement Ampère. Remarquons qu'il ne fait aucune allusion au sens du courant influençant par rapport au mouvement de l'anneau⁷⁰.

Comme cela a déjà été souligné, il s'agissait là d'un phénomène d'induction qui ne fut reconnu comme tel qu'en 1831 après la découverte de Faraday.

Auguste de La Rive, en rapportant rapidement l'expérience, écrit : « En présentant à un côté de cette lame (l'anneau de cuivre) un aimant en fer à cheval, très fort, on l'a vu tantôt s'avancer entre les deux branches de l'aimant, tantôt au contraire en être repoussé, *suivant le sens du courant dans les conducteurs environnants* »⁷¹ et J.F. Demonferrand dans son *Manuel d'électricité dynamique*, qui eut une grande diffusion aussi bien en France qu'à l'étranger (voir plus loin (§ V-4)), est encore plus net dans sa conclusion : « un courant électrique tend à mettre en mouvement *dans le même sens* l'électricité des conducteurs près desquels il passe »⁷².

Ces affirmations sont à l'origine de la controverse entre Ampère et Faraday en 1833, ce dernier ayant cru qu'Ampère avait affirmé que le courant par influence était dans le même sens que le courant influençant et ayant en outre mal compris dans la traduction du mémoire son dispositif expérimental. Ampère se voit alors obligé de rappeler son résultat de 1822 à son coexpérimentateur A. de La Rive : « Il est de fait que nous avons obtenu les premiers, en 1822, le courant électrique par influence ou induction, comme dit M. Faraday (...). Malheureusement, ni vous, ni moi, nous ne songeâmes à analyser ce phénomène et à en reconnaître toutes les circonstances. Nous aurions vu, ce qu'a découvert depuis M. Faraday, que ce courant ne dure qu'un instant et qu'il a lieu en sens contraire du courant établi dans la spirale qui le produit par induction. C'est à M. Faraday qu'appartient la découverte de toutes les lois des courants produits par *influence* »⁷³.

Il justifie ainsi cet abandon du sujet dans sa longue lettre à Faraday du 13 avril 1833 : « J'avoue que je n'ai point cherché dans le temps à déterminer dans quel sens se produisait le courant par induction. Je

69 *Correspondance*, t. II, p. 599 et t. III, p. 674.

70 « Notice sur quelques expériences nouvelles ... », mémoire lu le 16 septembre 1822 publié d'après le manuscrit autographe dans *Coll. Mém.*, t. II, p. 334. Le 8 novembre 1833, Ampère écrit ce propos à de La Rive : « Quant à la direction semblable ou contraire des courants (par influence), je n'ai jamais, en effet, fait les expériences nécessaires pour la déterminer.

Mais il est de fait que, dans trois ou quatre endroits de mes mémoires ou opuscules dans lesquels j'en ai parlé, j'ai toujours évité d'en parler parce que je me proposais toujours d'entreprendre, sur les courants par influence, un travail complet que je n'ai jamais fait ». (*Correspondance*, t. II, p. 774).

71 *A.C.P.*, t. 21, p. 48 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 328.

72 *Manuel d'électricité dynamique*, p. 174 (passage souligné dans le texte).

73 *Correspondance*, t. II, p. 76

n'avais qu'un but en faisant alors ces expériences. *Je cherchais seulement (...) à résoudre cette question : les courants électriques, auxquels sont dues les attractions et répulsions magnétiques préexistent-ils avant aimantation autour des molécules du fer (...)* dans une position qui ne leur permet d'exercer aucune action au-dehors, ou bien sont-ils produits à l'instant de l'aimantation par l'influence des courants voisins ? ».

Si le résultat négatif de juillet 1821 lui parut une preuve de la préexistence, par contre, le résultat positif de septembre 1822 n'en fut pas une en faveur de l'autre hypothèse, la création de ces courants par influence :

« Je pensai que la grande question de la préexistence ou de la non-préexistence des courants moléculaires des métaux susceptibles d'aimantation *ne pouvait plus être déterminée de cette manière*, qu'elle devait rester indécise jusqu'à ce qu'elle pût être résolue par d'autres moyens, et je ne mis plus autant d'importance à ces expériences que j'eus le tort de ne pas étudier plus à fond »⁷⁴.

En fait, dans son mémoire de 1822, Ampère est encore plus négatif :

« Ce fait indépendant jusqu'à présent de la théorie générale des phénomènes électrodynamiques, n'apporte aucun changement à cette théorie »⁷⁵.

Le ton est définitif. Il semble repousser cette expérience comme une expérience « gênante » puisqu'elle allait contre sa conviction théorique en faveur des courants préexistants.

Peut-être est-ce aussi à cause de cette expérience qu'il ne publia pas de mémoire spécialement consacré au magnétisme comme il en avait l'intention quelques mois plus tôt ?

V. LES ESSAIS DE SYNTHÈSE (1822-1824)

1. L'« Exposé des nouvelles découvertes sur l'électricité et le magnétisme » d'Ampère et Babinet

Paradoxalement le premier ouvrage de synthèse sur la théorie d'Ampère, paru en février 1822, fut l'œuvre d'un autre que lui. .

En effet, bien que le nom de l'Académicien A.M. Ampère figure devant celui du professeur de mathématiques au Collège St-Louis, Jacques Babinet, il n'en a apparemment écrit que quelques pages⁷⁶.

Ce livre, qui fut également publié dans le supplément à la traduction française de la 5^e édition du *Système de Chimie* de M. Thomson (1822) en même temps qu'un exposé de synthèse de la théorie ondulatoire par Fresnel, décrit toutes les expériences et principes théoriques d'Ampère d'après ses mémoires publiés. Toutefois il ne fait appel à aucune formule mathématique.

Si Ampère fait assez peu souvent référence à cet ouvrage, c'est sans doute parce qu'il contient un long développement sur le théorème erroné que celui-ci avait annoncé le 11 décembre 1820 (voir chap. III & III-4) selon lequel « deux portions de surfaces couvertes de courants électriques dirigés dans le même sens exercent, à quelque distance que ce soit, la même action attractive ou répulsive sur un point pour lequel elles interceptent des portions égales d'une surface sphérique infinie, de même que des surfaces également chauffées exercent dans le même cas, la même action calorifique »⁷⁷.

⁷⁴ *Correspondance*, t. II, p. 765.

⁷⁵ *Recueil*, p. 322

⁷⁶ D'après Babinet, dans *Etudes et lectures sur les sciences d'observation et leurs applications pratiques*, t. I, 1855, p. 59, Ampère n'aurait écrit que les paragraphes sur la Distinction des deux espèces d'électricité (p. 166), celui sur le télégraphe et enfin celui de l'aimantation reproduit dans la lettre à Yan Beck (*Journal de Physique*, t. 93, p. 460-467 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 228-236; voir aussi *Correspondance*, t. II, p. 619). Une épreuve du paragraphe « Phénomènes que présente la pile quand ses deux pôles communiquent par un fil conducteur » est corrigée de la main d'Ampère dans les Archives de l'Académie des Sciences, carton XI, chem. 208.

⁷⁷ *Annales des Mines*, t. V, 1820, p. 552 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 136.

En outre, les courants dans les aimants n'y sont pas décrits comme particuliers, n'étant même pas représentés fermés.

Ceci ne pouvait donc servir à Ampère de présentation et défense de sa théorie. C'est d'ailleurs ce que lui fait remarquer le 5 juillet 1822, son ami genevois le baron Maurice, en l'incitant à se mettre lui-même à l'ouvrage : « Ces choses délicates, aujourd'hui que beaucoup de lecteurs sont plus ou moins géomètres, ne doivent être exposées qu'avec toute la rigueur que permet le calcul *seul*. Voyez s'il n'y a pas là de quoi vous faire prendre courageusement la plume durant les loisirs de votre voyage et des vacances pour présenter un exposé *synthétique* et rigoureux de toutes vos idées »⁷⁸.

2. L'« Exposé méthodique des phénomènes électrodynamiques » d'Ampère

En attendant de trouver le temps nécessaire à ce travail d'envergure, Ampère y réfléchit. C'est une première ébauche qu'il envoie à A. de La Rive en octobre 1822, espérant voir sa lettre publiée dans la *Bibliothèque Universelle* : il a suivi jusqu'alors l'ordre chronologique pour exposer sa théorie, « mais cet ordre, déterminé par des circonstances fortuites, n'est pas celui qui conviendrait à une exposition méthodique »⁷⁹. Désormais les deux faits les plus généraux sont : l'attraction entre les côtés d'un angle lorsqu'ils sont parcourus par des courants se dirigeant tous deux vers le sommet ou s'en éloignant tous deux et la répulsion entre ces côtés si l'un des courants s'approche et l'autre s'éloigne. Il propose dans cette lettre d'étudier d'abord les actions entre courants, puis les actions courants-terre et enfin l'aimantation.

Ce travail serait fort utile à Ampère car, dit-il « il me semble que, s'il existait un ouvrage où les faits fussent présentés dans cet ordre, on s'apercevrait tout de suite que mon opinion sur la cause de ces faits et leur dépendance mutuelle est *moins une hypothèse qu'une exposition méthodique des phénomènes observés et des conséquences qui se déduisent immédiatement de leur rapprochement* »⁸⁰.

Outre la méfiance, tenace dans l'histoire, vis-à-vis du terme « hypothèse », il faut noter dans cette phrase l'annonce du titre de l'opuscule de 24 pages qu'Ampère fait paraître quelques mois plus tard : *Exposé méthodique des phénomènes électro-dynamiques et des lois de ces phénomènes*⁸¹.

Il y suit l'ordre annoncé à A. de La Rive en prenant toutefois comme premier fait dans « l'ordre naturel » (par opposition à l'ordre chronologique), « la répulsion mutuelle de toutes les parties d'un courant électrique rectiligne »⁸² ; les seuls éléments nouveaux sont les résultats de Savary et Demonferrand (voir plus loin) qui sont rapidement résumés à la fin. Ce texte, trop bref, ne peut encore être considéré comme une synthèse, mais seulement comme un plan d'étude.

3. Le « Recueil d'observations électro-dynamiques » d'Ampère

Renonçant provisoirement à rédiger un véritable traité de la nouvelle science, Ampère se résout à en faire une somme : le « *Recueil d'observations électro-dynamiques*, contenant divers mémoires, notices, extraits de lettres ou d'ouvrages périodiques sur les sciences, relatifs à l'Action mutuelle de deux courants

⁷⁸ *Correspondance*, t. III, p. 925. En fait Ampère passait une bonne partie de ses « vacances » à inspecter les Collèges royaux!

⁷⁹ *Correspondance*, t. II, p. 611

⁸⁰ *Ibid.*, p. 619. «

⁸¹ Dès le 28 décembre 1822, il envoie une épreuve à A. de La Rive (*Correspondance*, t. II, p. 922). Ce texte est paru dans le *Bulletin des Sciences de la Société Philomatique*, 1822, p. 177-183, puis à chaque fois avec de nouvelles additions dans le *Journal de Physique*, t. 95, p. 248-257, dans le *Recueil*, p. 325-344 et enfin tiré à part en février 1823. Ampère fait allusion à ses problèmes de publication pour ce court ouvrage à de nombreuses reprises dans sa *Correspondance* (t. II, p. 622, 625-627, 764).

⁸² *Recueil*, p. 326.

électriques, à celle qui existe entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et à celle de deux aimants l'un sur l'autre, par M. Ampère ».

Cet ouvrage publié entre 1822 et 1823 contient ; outre les écrits d'Ampère, des lettres de Berthollet, Davy, et des mémoires de Faraday, A. de La Rive et Savary. Ampère lui-même ajoute quelques textes spécialement conçus, en particulier une longue note sur l'*Exposé des nouvelles expériences*, lu le 8 avril 1822, une préface au mémoire de de La Rive et une Note à la suite de celui de Savary.

Ce recueil de textes est très utile pour l'étude de l'œuvre d'Ampère, même si la rédaction de certains mémoires a été légèrement modifiée par rapport aux textes originaux ⁸³.

4. Le « Manuel d'électricité dynamique » de J.F. Demonferrand

Le *Recueil* n'eut cependant pas une grande diffusion et fut vite épuisé. C'est encore un ouvrage d'un autre qu'Ampère qui y suppléa : le *Manuel d'électricité dynamique*, de J.F. Demonferrand, professeur de mathématiques au Collège royal de Versailles et collaborateur au *Bulletin* de Férussac, paru en 1823. Traduit en italien et en anglais, ce livre reçut l'approbation d'Ampère (contrairement à celui de Babinet) : le 21 août 1823, il écrit à A. de La Rive :

« Je ne sais si l'on connaît (à Genève) un Précis que je trouve très complet et très bon sur tout ce qui dépend de l'électricité dynamique ; il est de M. de Monferrand (*sic*) et a été publié sous ce titre *Manuel d'électricité dynamique*, etc., chez Bachelier, libraire, quai des Augustins ». Il le recommande également à Faraday, et lui en envoie même un exemplaire ⁸⁴.

L'ouvrage postérieur d'Ampère s'intitule d'ailleurs « *Précis de la théorie des phénomènes électrodynamiques*, par M. Ampère, pour servir de supplément à son *Recueil d'observations électro-dynamiques* et au *Manuel d'électricité dynamique* de M. Demonferrand ».

Ayant lui-même expérimenté avec Ampère, Demonferrand dut bénéficier de nombreux conseils de la part de celui-ci. Suivant de très près les mémoires d'Ampère, il expose également certaines idées que celui-ci n'avait développées que dans des lettres privées comme, par exemple, la critique du terme de pôle pour désigner les extrémités de la pile. Il explique également les incompréhensions entre Français et Anglais sur le sens du courant dans un circuit par la différence de constitution des piles (voir fig. 3 p. 26). C'est aussi la première fois que le mouvement des deux fluides électriques opposés dans un conducteur est remplacé définitivement par des décompositions et recompositions du fluide neutre :

« Il est difficile d'admettre que les deux électricités positive et négative se meuvent simultanément dans le même conducteur sans reformer du fluide neutre ; il est beaucoup plus probable que le transport des deux électricités se fait par une série de décompositions et de recompositions successives (...). On pourra toujours donner le nom de courant électrique à cette disposition particulière d'électricité » ⁸⁵.

⁸³ Ampère commença à composer l'ouvrage en septembre 1822, mais il voulut rajouter ses mémoires ultérieurs au fur et à mesure de leur parution, d'où des complications sans fin pour faire compléter ceux des ouvrages qu'il avait déjà envoyés à Londres ou à Genève, ainsi que des problèmes de bibliographie matérielle. Ainsi la dernière version de l'ouvrage qui porte encore la date d'édition 1822, contient-elle une lettre d'Ampère à Faraday, du 18 avril 1823 (d'ailleurs non signalée au sommaire). A Paris l'exemplaire du Muséum est incomplet par rapport à celui de la Sorbonne.

⁸⁴ *Correspondance*, t. II, p. 636 et 653, 679. Ampère fait lui-même référence à l'ouvrage dans le « Mémoire sur l'action mutuelle d'un conducteur voltaïque et d'un aimant », dans *Mémoires de l'Académie Royale de Bruxelles*, t. IV, 1827, p. 37 et *Coll. Mém.* t. III, p. 246 et 282. Le livre fut traduit en italien par le Dr Gherardi (*Coll. Mém.*, t. III, p. 217) et en anglais par J. Cumming (1827) et reproduit par extraits par P. Roget dans *Treatise on electricity, galvanism, magnetism and electromagnetism* (1832). C'est par ces traductions anglaises que l'œuvre d'Ampère est diffusée aux Etats-Unis.

⁸⁵ *Correspondance*, t. II, p. 610 et *Manuel d'électricité dynamique*, p. 9.

On reconnaît là la théorie du courant soutenue par Ørsted dès 1806 et réaffirmée en 1813 (voir chap. I, §11.2).

CONCLUSION

A la fin de cette première partie de la deuxième phase des recherches d'Ampère, les rotations continues ont porté un coup fatal à la philosophie newtonienne. Ampère lui-même insiste à plusieurs reprises sur cette violation du principe de la conservation des forces vives qui implique l'abandon de l'espoir de réduire les phénomènes électromagnétiques à des forces fonctions seulement de la distance.

Le rôle fondamental du mouvement, mouvement des fluides électriques, est déjà affirmé. Cependant pour Ampère cette nouveauté radicale peut encore se traduire par une modification du schéma newtonien : la force élémentaire est désormais fonction non seulement de la distance, mais encore des angles entre les éléments qui s'attirent ou se repoussent.

La formule électrodynamique étant complètement déterminée, le problème n'est plus qu'un problème d'analyse mathématique. Cependant ce travail d'application de l'analyse aux divers cas d'interactions entre courants et aimants reste encore à faire.

Nous allons voir dans le chapitre suivant Savary entraîner Ampère sur cette voie.

Il lui faut également présenter une synthèse de son œuvre qui respecte les normes scientifiques de l'époque ; c'est ce à quoi il va également s'attacher pendant cette deuxième période.

DÉVELOPPEMENTS MATHÉMATIQUES ET NOUVELLES INTUITIONS PHYSIQUES

Si en 1821 c'est le mémoire de Faraday qui incita Ampère à reprendre l'étude des phénomènes électromagnétiques, en 1823 c'est à l'instigation de son ancien élève F. Savary qu'il se plonge dans les développements analytiques de sa formule. Malgré ses problèmes financiers de plus en plus aigus, malgré le surcroît de travail apporté par la rédaction de son cours à l'Ecole Polytechnique, Ampère parvient à démontrer d'importants théorèmes. Il revient en même temps sur la théorie du magnétisme pour changer à nouveau le modèle des courants dans les aimants.

I. LES MÉMOIRES DE SAVARY ET DEMONFERRAND (FÉVRIER 1823)

La collaboration de Savary avec Ampère remonte à l'automne 1821 : rédaction des *Notes* qui suivent le mémoire de Faraday, correction des épreuves d'un *Précis électromagnétique* (qui ne vit pas le jour, du moins sous ce titre) et enfin calculs sur l'action entre courants et sur l'inclinaison des courants dans les aimants ¹.

Comme le souligne Charles Fabry, dont le grand-père avait été l'élève d'Ampère, le rôle de Savary a été important pendant cette période pour Ampère :

« Il s'en est fallu de peu que (son œuvre) resta inachevée ; la formule qu'il avait donnée (...) contenait une constante encore inconnue et Ampère paraissait ne plus s'en soucier ; ce furent les calculs de son élève Savary (le « major » de la promotion 1815) qui rappelèrent son attention et, c'est lui qui le dit formellement, l'aiderent à achever son œuvre »².

A l'automne 1822, Savary s'attaque à une tâche d'une autre envergure : déduire la loi de Coulomb sur les aimants et celle de Biot sur l'action entre un pôle magnétique et un conducteur de celle d'Ampère, en considérant l'aimant comme « un assemblage de courants électriques circulaires, dont les plans sont parallèles entre eux et perpendiculaires à la ligne qui joint les centres des cercles décrits par ces courants »³

1 - Pour les « Notes » suivant le Mémoire de Faraday, voir chap. IV note 8.

– Pour le *Précis...*, voir *Correspondance*, t. II, p. 575.

– Pour l'aide de Savary dans les calculs, voir *Correspondance*, t. II, p. 576 et 579-582.

2 C. FABRY, « Ampère et l'Ecole polytechnique », dans *Œuvres Choiesies*, 1938, p. 663.

3 *Journal de Physique*, t. 96, 1823, p. 2 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 340. Un tel assemblage est appelé « cylindre électro-dynamique » dans le cas où la ligne des centres est quelconque et « anneau électro-dynamique » lorsque c'est un cercle.

Son mémoire « Sur l'application du calcul aux phénomènes électrodynamiques » lu le 3 février 1823 à l'Académie des Sciences et publié dans le *Journal de Physique* contient les résultats de ses recherches. Savary propose d'abord un nouveau moyen de déterminer les constantes k et n de la formule d'Ampère, moyen qui ne suppose pas $n = 2$, comme Ampère l'a admis sans preuve expérimentale dans son mémoire du 10 juin 1822 (voir chap. IV § III-2).

Il déduit cette relation supplémentaire entre n et k de l'expérience de Gay-Lussac et Welter. Le résultat de cette expérience réalisée en 1820 n'a pas été publié par ses auteurs, mais Ampère y fait souvent référence.

Dans une lettre inédite, sans doute de 1821 ou 1822, on peut lire sous la plume d'Ampère une description de cette expérience :

« Ils ont soumis au procédé d'aimantation découvert par M. Arago un anneau d'acier (c'est-à-dire en l'entourant d'une hélice parcourue par un courant), et tant que cet anneau est resté entier, il n'a eu aucune autre sorte d'action sur une aiguille de boussole qu'avant d'avoir été aimanté, mais dès qu'il a été rompu en plusieurs morceaux, chaque morceau a agi comme un aimant ordinaire. Ce qui démontre qu'avant qu'on l'eût divisé, il devait nécessairement être considéré par ceux qui défendent la théorie ordinaire du magnétisme, comme un assemblage de séries de petits aimants (...) formant des circonférence parallèles à la courbure de l'anneau (...). M. Gay-Lussac en m'apprenant ce fait si remarquable, m'a autorisé à le publier. Il est parfaitement d'accord avec la manière dont je conçois l'action d'un aimant produite par des courants électriques »⁴.

En considérant l'aimant annulaire comme un ensemble d'« anneaux électrodynamiques », chaque « anneau » ayant la même ligne des centres que l'anneau global, l'expérience montre que la force exercée par chaque anneau à l'extérieur est nulle.

Pour simplifier les calculs, Savary suppose en outre dans tout le mémoire que le rayon des courants circulaires est petit devant celui de l'anneau.

Le résultat de l'intégration implique la relation $kn + 1 = 0$ qui, jointe à la relation obtenue par Ampère

en juin 1822, $k = \frac{1-n}{2}$, donne les deux couples de solutions suivantes :

$$\begin{cases} n = 2 \\ k = -\frac{1}{2} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} n = -1 \\ k = 1 \end{cases}$$

Or, Ampère ayant déjà montré, par la répulsion des parties contiguës d'un même courant, que k est négatif, la solution est le couple $n = 2$, $k = -\frac{1}{2}$.

La première utilisation faite par Savary de la formule d'Ampère à nouveau déterminée, est la déduction de la loi de Biot qui est traduite ainsi dans le langage de la théorie d'Ampère :

« L'action d'un cylindre électrodynamique sur un élément de courant peut être représentée par deux forces, chacune de ces forces étant en raison inverse du carré de la distance d'une des extrémités du cylindre à l'élément, proportionnelle au sinus de l'angle que fait la même distance avec la direction de l'élément et dirigée perpendiculairement au plan de cet angle »⁵.

Il montre également que si un conducteur quelconque se trouve à une distance d'une des extrémités du cylindre grande devant sa distance à l'autre extrémité, l'action du cylindre se réduit à une force émanant de l'extrémité (c'est-à-dire pour un aimant, du pôle) la plus proche.

⁴ Arch., carton IX, chem. 182.

⁵ Coll. Mém., t. II, p. 341.

Reprenant l'expérience de Biot relative aux courants inclinés (voir chap. II & V), il analyse l'erreur de ce dernier en montrant que la force exercée par le fil coudé sur un pôle magnétique est proportionnelle

à $\operatorname{tg} \frac{i}{2}$ i étant la moitié de l'angle formé par le fil, et non à i comme Biot l'avait affirmé.

Ampère commente avec une certaine ironie cette erreur de Biot et sa rectification par Savary dans son *Précis de la théorie des phénomènes électrodynamiques* (1824) : « Il est assez remarquable que cette loi (de Biot et Savary...) a d'abord été trouvée par une erreur de calcul » ! ⁶

La loi de Coulomb sur les aimants se déduit alors du fait que l'action entre deux cylindres électrodynamiques se réduit à quatre forces entre les extrémités, égales à celles qu'exercent les pôles d'un aimant.

Dans une addition à ce mémoire, lu le 28 juillet 1823, Savary généralise le résultat à un cylindre courbe quelconque : tant que le rayon des courants circulaires est petit devant la longueur de la ligne qui joint leurs centres, l'action exercée par ce cylindre se réduit à deux forces ayant pour origines ses extrémités.

Pour déduire la loi de Biot et celle de Coulomb de la formule d'Ampère, Savary a dû ne pas tenir compte de l'hypothèse de l'inclinaison des courants dans les aimants formulée par Ampère. Son calcul est donc une approximation par rapport aux aimants réels où les pôles sont situés à une certaine distance des extrémités.

Pour tenter de calculer l'équivalent électrodynamique du globe terrestre, il est contraint de modifier encore davantage l'hypothèse initiale d'Ampère. Selon ce dernier en effet, on devait pouvoir expliquer les propriétés magnétiques de la terre par un courant circulaire d'Est en Ouest le long de l'équateur magnétique, et proche de la surface de la terre.

Savary remplace cette hypothèse par celle de « courants parallèles à l'équateur magnétique dont l'intensité aille en décroissant très rapidement de part et d'autre de cet équateur et dont les rayons soient assez petits relativement à celui de la terre, pour qu'on puisse négliger, dans le calcul, les 4² puissances de leurs rapports à ce dernier rayon ».

Avec cette hypothèse il obtient la relation de Bowditch entre l'inclinaison magnétique et la latitude :

$$\operatorname{tg} i = 2 \operatorname{tg} \lambda.$$

Enfin il calcule les forces mises en jeu dans les deux expériences fondamentales de Faraday. Dans la rotation continue du fil conducteur mobile autour d'un aimant (fig. 32) il montre que l'action est inversement proportionnelle au rayon du cercle décrit par l'extrémité inférieure du conducteur ; et dans l'action entre un aimant horizontal et un conducteur vertical infini, il détermine la direction de la force résultante sur le conducteur ainsi que le cercle qui est la courbe limite évoquée dans les Notes qui suivent le mémoire de Faraday (voir chap. IV & I-2).

Le mémoire que Demonferrand lut le même jour que Savary ne fut pas publié, bien que l'Académie ait proposé de le publier, ainsi que celui de Savary dans le *Recueil des Savants étrangers*. Il contenait le même type de calculs sur l'action entre cylindres électrodynamiques et conducteurs ⁷.

⁶ Note B du *Précis de la théorie des phénomènes électrodynamiques* (1824) et (Coll. Mém., t. III, p. 99. Dans la Note v de la *Théorie des phénomènes électrodynamiques* (1826), Ampère, après avoir refait l'intégration correspondante, est encore plus sarcastique envers Biot : « On ne peut douter qu'il n'y eut quelque erreur dans ce calcul ; mais il serait d'autant plus curieux de le connaître, qu'il avait pour but de déterminer la valeur d'une différentielle par celle de l'intégrale définie qui en résulte entre des limites données, ce qu'aucun mathématicien ne me paraît jusqu'à présent avoir cru possible » ! *Théorie des phénomènes électro-dynamiques*, p. 217 et Coll. Mém., t. III, p. 186).

⁷ Le mémoire de Savary a été résumé dans les *A.C.P.*, t. 22, 1823, p. 91-100 (extrait reproduit dans le *Recueil* où il est suivi d'une addition originale d'Ampère). Les deux mémoires de SAVARY et DEMONFERRAND ont été résumés ensemble dans la *Bibliothèque Universelle*, t. 22, 1823, p. 259-264 et dans le *Bulletin des Sciences de la Société Philomatique*, 1823, p.61-63

Les résultats de Savary et Demonferrand sont fondamentaux pour Ampère : les principaux phénomènes magnétiques se déduisent mathématiquement de sa théorie. Le 4 février 1823, il écrit à A. de La Rive :

« La séance d'hier de l'Académie des Sciences marque une sorte d'époque dans l'histoire de l'électricité dynamique (...). Il résulte de leur ensemble (des mémoires de Savary et Demonferrand) que tous les faits non encore expliqués complètement, observés par MM. Gay-Lussac et Welter, Pouillet, Biot et Savary, les expériences de Coulomb sur les aimants, les vôtres, celles de MM. Faraday et Barlow, la loi connue de l'inclinaison de l'aiguille aimantée, etc., sont des conséquences nécessaires de ma formule »⁸.

Mais c'est surtout la conséquence théorique qui est fondamentale : la loi de Biot et celle de Coulomb sont désormais des conséquences mathématiques de celle d'Ampère et il est impossible de remonter de ces dernières à la formule d'Ampère puisqu'elles en sont déduites par intégration. Ainsi pour Ampère le travail de Savary contient « les preuves les plus complètes et les plus irréfragables de sa théorie »⁹ et même ces résultats « ont rendu inutile une grande partie des détails où (il) avait cru devoir entrer pour justifier sa théorie »¹⁰.

Le but ultime d'Ampère est alors atteint : disposer d'une théorie du magnétisme qui unifie, grâce à l'analyse mathématique, dans un même ensemble tous les phénomènes magnétiques, électromagnétiques et électrodynamiques.

Cette réussite de Savary et Demonferrand contribua à faire espérer à Ampère que la science de l'électricité pourrait jouer un rôle encore plus fondamental et unificateur dans l'avenir. Quelques découvertes faites à l'époque sur le rôle de l'électricité en physiologie lui font rêver d'une grande synthèse.

En août 1823, il écrit : « la découverte de MM. Prevost et Dumas, en se joignant aux expériences sur la digestion rétablie par le courant électrique après la section des nerfs pneumo-gastriques, va montrer que *c'est encore la même cause, l'électricité, qui préside à la vie végétative et à l'exécution de nos volontés par nos membres* ». Et en septembre 1823 à Bredin :

« Jamais les séances de l'Institut n'ont eu si fréquemment de si importants mémoires. Voilà les courants électriques qui produisent : d'une part les actions chimiques, de l'autre la digestion et les contractions des muscles. *Tout est ramené au même principe d'action dans la nature* par des expériences et des observations dont c'est là une conséquence nécessaire »¹¹.

Ampère partage ici avec Ørsted le grand espoir d'expliquer tous les phénomènes physiques, chimiques et physiologiques par les forces électriques.

II. LES DÉVELOPPEMENTS ANALYTIQUES D'AMPÈRE

Les succès de Savary suscitent chez Ampère le désir de déduire de sa formule le plus grand nombre de conséquences possibles.

Dans un manuscrit du 24 novembre 1823, on peut lire : « On connaît les travaux de MM. Demonferrand et Savary sur l'accord des résultats déduits de ma formule et de ceux que donne l'expérience ; c'est surtout du travail plus complet de M. Savary que je me suis aidé dans ce mémoire, et je dois déclarer que, sans ce secours, je n'aurais probablement pas pu tirer de ma formule toutes les conséquences que je me propose de faire connaître »¹².

⁸ *Correspondance*, t. II, p. 624.

⁹ « Observation additionnelle par M. Ampère », dans *Recueil*, p. 364.

¹⁰ *Correspondance*, t. II, p. 630.

¹¹ *Correspondance*, t. II, p. 636 et 638 (voir aussi *Coll. Mém.*, t. II, p. 407).

¹² Manuscrit cité par J. Joubert dans *Coll. Mém.*, t. II, p. 396, n.1

Le mémoire en question, lu les 22, 29 décembre 1823 et 5 janvier 1824, est pour Ampère « ce qu'(il) regarde de plus important de tout ce qu'(il) a fait depuis trois ans dans cette nouvelle branche de la physique qui est à peu près son ouvrage »¹³. Il forme d'ailleurs une grande partie de la *Théorie des phénomènes électrodynamiques* parue trois ans plus tard.

Ce mémoire contenait deux parties : une partie de calculs analytiques à partir d'une nouvelle expression mathématique de la force s'exerçant sur un élément de courant et d'autre part une partie physique sur « la nature du courant électrique, la manière dont il est produit (...), et les phénomènes qui dépendent de l'action chimique de l'électricité et de la production des courants électriques par l'influence d'autres courants, non seulement dans les métaux magnétiques, mais, en général, dans tous les corps soumis à cette influence »¹⁴.

Cette deuxième partie ne se trouve que résumée rapidement dans le tome 26 *Annales de Chimie* où fut publié le mémoire, mais nous avons trouvé dans le *Traité de Télégraphie électrique* de l'Abbé Moigno (1849) un texte d'Ampère qui correspond à la description donnée dans l'extrait publié dans son mémoire¹⁵.

Ce texte publié en Annexe III sera étudié plus loin (§ III).

1. L'intervention de la « directrice »

Dans la partie mathématique du mémoire, Ampère obtient peu de résultats nouveaux par rapport à Savary mais il fait intervenir pour le calcul de la force s'exerçant sur un élément de courant une droite, nommée « directrice », qui n'est autre que le support de l'induction magnétique au point où se trouve l'élément de courant.

Cet auxiliaire de calcul lui permet de caractériser l'action magnétique d'un circuit fermé en un point quelconque, indépendamment de la portion de circuit sur laquelle on considère son action. Cette manière de poser le problème est donc beaucoup plus proche de celle qui utilise le champ magnétique que des calculs analytiques utilisés dans la théorie de la gravitation.

Nous allons d'ailleurs voir, entre 1824 et 1826, Ampère être de plus en plus sensible à la modification des propriétés de l'espace par un courant électrique et même en conclure à une modification de la structure de cet espace par la création d'éléments magnétiques.

Après avoir rappelé que la force exercée par un circuit *fermé* sur un élément de courant ds' est perpendiculaire à cet élément (voir chap. IVIII-2) Ampère montre qu'elle appartient en outre à un plan nommé « plan directeur de l'action électrodynamique au point donné ».

Ce plan est défini par le fait que la force exercée par le circuit fermé est maximale lorsque l'élément de courant appartient à ce plan. C'est la perpendiculaire à ce plan directeur au point considéré qui est nommée « normale au plan directeur » et plus tard « directrice » (fig. 52).

Si l'élément est dirigé suivant cette normale, la force exercée sur lui est nulle.

¹³ *Correspondance*, t. II, p. 639. Ce Mémoire a été publié dans les *A.C.P.*, t. 26, 1823, p. 134-162 et 246-258, et tiré à part avec l'addition de notes importantes sous le titre « *Précis de la théorie des phénomènes électrodynamiques*, pour servir de supplément à son *Recueil d'observations électrodynamiques* et au *Manuel d'électricité dynamique* de M. Demonferrand » (1824). On dispose en outre d'un « Extrait d'un mémoire sur les phénomènes électrodynamiques, lu le 22 décembre 1823 » dans le *Bulletin des Sciences de la Société Philomatique*, 1824, p. 79-85, et d'une version plus développée de cet extrait dans la *Coll. Mém.*, t. II, p. 395-410 d'après un manuscrit des Archives de l'Académie des Sciences. Il existe encore à la Bibliothèque de Lyon un manuscrit sur le mémoire lu le 29 décembre 1823 et le 5 janvier 1824.

¹⁴ *Coll. Mém.* t. II, p. 397. La lecture de cette deuxième partie le 5 janvier 1824 est signalée par Ampère dans les *A.C.P.*, t. 25, 1824, p. 88-90 (« Extrait des Séances de l'Académie Royale des Sciences »).

¹⁵ Dans le résumé des *A.C.P.* (t. 25), Ampère annonce en particulier la fin du mémoire l'explication des expériences de Becquerel, explications qui se trouvent effectivement à la fin du texte de Moigno.

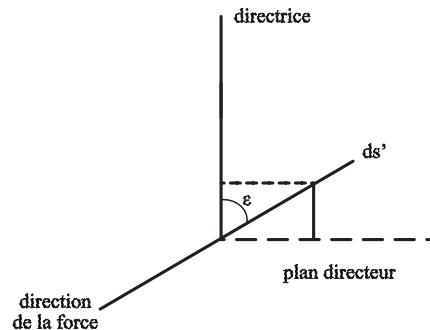


Fig. 52

Si l'élément ds' parcouru par le courant i' fait avec la directrice l'angle ε , Ampère montre que la force a pour intensité

$$R = \frac{1}{2} D i i' ds' \sin \varepsilon$$

i étant l'intensité du circuit fermé et $D = \sqrt{JA^2 + B^2 + C^2}$ où A, B et C sont trois quantités ne dépendant que de la géométrie du circuit fermé et du point où se trouve l'élément de courant ¹⁶.

On reconnaît dans cette formule ce qu'on appelle en France la « loi de Laplace » (alors qu'elle ne doit rien à Laplace ; d'ailleurs à l'étranger elle est généralement appelée « formule d'Ampère ») où le facteur $\frac{Di}{2}$ représente l'intensité du vecteur induction magnétique ¹⁷.

Il faut cependant souligner que la notion de vecteur, ici un vecteur qui aurait pour direction celle de la directrice et pour intensité la quantité $D \left(\text{ou } \frac{Di}{2} \right)$ n'apparaît pas.

La directrice n'est qu'une droite géométrique dont les cosinus directeurs sont d'utiles auxiliaires de calcul, et telle que si l'élément de courant lui est colinéaire, la force subie est nulle.

Il faut également souligner que cette formule ne s'applique qu'à l'action d'un circuit fermé. Pour un circuit ouvert, Ampère montre, d'une façon peu convaincante à partir d'une expérience de Savary, que la force exercée sur un élément de courant ne lui est même pas perpendiculaire.

Il y trouve un nouvel argument en faveur du fait que la force entre deux éléments de courants est dirigée suivant la droite qui les joint.

Muni de ce nouvel auxiliaire de calcul, qu'est la directrice, Ampère reprend les démonstrations de Savary : utilisation de l'expérience de Gay-Lussac et Welter pour obtenir une nouvelle relation entre les constantes k et n de sa formule, action d'un solénoïde courbe quelconque (c'est d'ailleurs dans ce mémoire qu'apparaît pour la première fois le terme de solénoïde) dont la longueur est cependant grande devant

¹⁶ Les intégrales A, B et C « sont les sommes des projections sur les plans coordonnés des aires des triangles qui ont leur sommet au milieu de l'élément ds' , et pour bases les différents éléments (du circuit fermé), toutes ces aires étant divisées par la puissance $n + 1$ du rayon vecteur r », A.C.P., t. 26, p. 141 et Coll. Mém., t. III, p. 37.

¹⁷ En notation moderne, la « loi de Laplace » donne la force élémentaire s'exerçant sur un élément de courant de longueur dl parcouru par un courant I , placé dans un champ magnétique d'induction \vec{B} :

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}.$$

le rayon des cercles qui le constituent, et enfin obtention de la loi de Coulomb en assimilant un aimant à un ensemble de solénoïdes parallèles.

2. Soucis divers, interruption de la recherche :

On pourrait penser que, avec ce mémoire, Ampère est heureux d'avoir mis un point d'orgue à sa théorie. Mais cet hiver 1823-1824 est pour lui une période très difficile : le 26 janvier 1824, il écrit à son fils Jean-Jacques, alors à Rome avec Mme de Récamier :

« Je n'ai jamais été si malheureux que je suis, si accablé d'ennuis et surchargé de travail. Je n'ai plus de consolation et, sans le plaisir inexplicable que j'éprouve à regarder mon jardin depuis que j'y ai pratiqué de nouveaux sentiers, je ne sais pas ce que je serais devenu »¹⁸.

Les ennuis auxquels il fait ici allusion sont d'abord d'ordre financier et remplissent sa correspondance pendant cette période. Le 26 mars, il avoue même :

« J'ai été obligé d'emprunter 50 francs à Fresnel pour faire aller le ménage, qui est du reste d'une stricte économie »¹⁹. Ampère devait de l'argent à tous ses fournisseurs et, entre autres, à Pixii son fournisseur d'instruments.

Autres soucis : sa candidature au Collège de France pour laquelle il montre quelque maladresse²⁰, et surtout l'arrêt du Ministère obligeant les professeurs de l'Ecole Polytechnique à rédiger leurs cours. Le 10 février 1824 il écrit :

« Il est impossible d'exprimer la peine que j'éprouve par l'excès de travail auquel je suis assujéti par l'ordonnance du Ministre qui oblige les professeurs de l'Ecole Polytechnique à rédiger et imprimer leurs leçons que jusqu'à présent on avait seulement données de vive voix (...). C'est un travail d'au moins de six mois à m'y mettre tout entier et à recommencer ensuite pour la seconde partie du cours. *Cela m'empêche absolument de rien faire en physique, la seule chose qui m'intéressât* »²¹.

Cette surcharge inattendue de travail l'empêche de publier aussi vite qu'il le voudrait son dernier mémoire. Il s'en plaint à son ami A. de La Rive : « J'ai lu le mois de décembre dernier un mémoire à l'Institut *qui termine tout*. Mais je ne sais comment l'imprimer et je n'ai pas le temps de m'en occuper »²².

A l'automne 1824 il lui faut désormais assurer deux cours, en effet il a été élu professeur de « physique générale et expérimentale » au Collège de France (J.B. Biot détenant la chaire de « physique générale et mathématique ») et il n'a pas réussi à échanger son poste à l'Ecole Polytechnique contre celui d'Inspecteur des Etudes qu'il avait été contraint d'abandonner avant son élection au Collège de France. Il regrette vivement cet état de fait lorsqu'il écrit à Faraday au début de 1825 :

« Je désirais avoir quelque nouvelle recherche de physique qui pût vous intéresser à vous communiquer ; mais j'ai été tellement accablé d'occupations indispensables que *je n'ai point pu faire les expériences que j'avais projetées* (...). Je n'ai donc aucune observation nouvelle »²³.

18 *Correspondance*, t. II, p. 641 (et aussi p. 648 et t. III, p. 997). 1

19 *Ibid.* t. II p. 642. Ampère reçut des crédits de l'Académie des Sciences pour mener ses expériences, mais sa gestion était si désastreuse que cela ne pouvait rétablir sa situation financière.

20 Voir sa *Correspondance* t. II, p. 650-657 et L. DE LAUNAY, *Le Grand Ampère!* p. 209-216.

21 *Correspondance*, t. III p. 938. Les quinze premières leçons de ce cours d'Ampère seront finalement publiées (voir la notice de C. Fabry citée p. 229, note 2).

22 *Correspondance* t. III, p. 648. Pendant l'été 1824, Ampère réussit cependant à le faire imprimer (voir note 13) ainsi qu'un opuscule de 24 pages, *Description d'un appareil électrodynamique*, qui ne contient pas de nouveauté, mais permet de réaliser toutes les expériences avec une seule table aménagée spécialement pour la démonstration publique. Cette disposition fut sans doute conçue pour son cours du Collège de France qui débutait à l'automne.

23 *Correspondance*, t. II, p. 674.

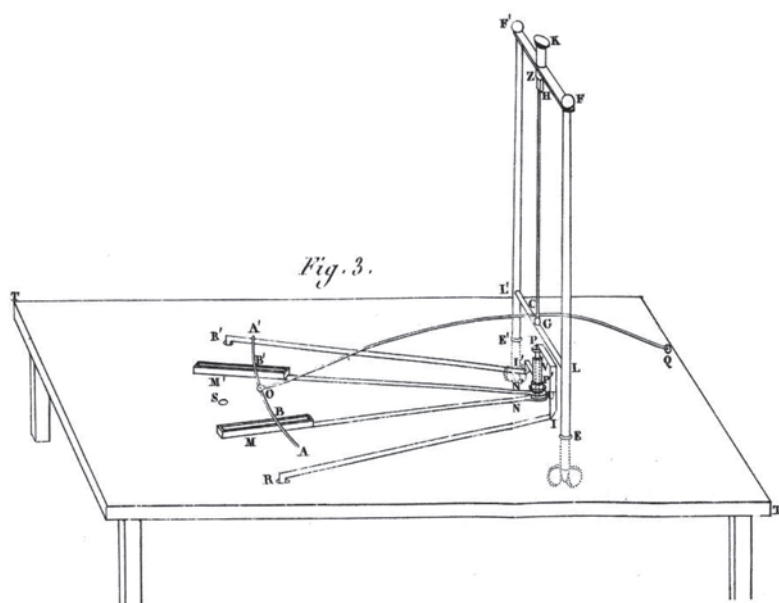
3. Le nouveau troisième cas d'équilibre (septembre-novembre 1825)

Ce n'est qu'en août 1825 qu'Ampère reprend la plume pour traiter d'électrodynamique. Il répond aux objections que l'italien L. Nobili avaient soulevées à l'encontre de sa théorie, objections auxquelles un autre Italien, le Docteur Gherardi avait commencé à répondre dans un mémoire envoyé à Ampère ²⁴.

L'intérêt essentiel de cette lettre à Gherardi réside dans le dernier paragraphe où Ampère commente le troisième cas d'équilibre qu'il avait exposé dans le mémoire lu le 10 juin 1822 (voir chap. IV§ 111-1) :

« Au reste, comme la manière dont j'avais déterminé la relation $2k+n=1$ n'était peut-être pas assez rigoureuse parce que je n'avais vérifié que sur un courant décrivant, soit une circonférence entière, soit une demi-circonférence, ce qui aurait dû l'être sur chaque élément du courant circulaire horizontal : c'est pourquoi j'ai imaginé un autre instrument à l'aide duquel on obtient entre n et k la même relation d'une manière plus simple, et on évite en même temps l'inconvénient dont je viens de parler, parce que l'expérience que je fais avec cet instrument prouve directement que l'action d'un circuit fermé sur un élément de courant électrique est toujours perpendiculaire à la direction de cet élément » ²⁵.

Cette nouvelle expérience destinée à remplacer le troisième cas d'équilibre en fournissant la même relation entre les constantes n et k est décrite dans un mémoire lu à l'Académie le 12 septembre 1825 et publié dans les tomes 20 et 30 des *Annales de Chimie et de Physique*. Il s'agit de la troisième expérience fondamentale adoptée dans la *Théorie des phénomènes électrodynamiques*.



Théorie mathématique, pl. 1, fig. 2

Fig. 53

²⁴ « Lettre de M. Ampère à M. Gherardi, sur divers phénomènes électrodynamiques », dans *A.C.P.*, t. 29, 1825, p. 373-381 et *Coll. Mém.*, t. III p. 217-223.

²⁵ *A.C.P.*, t. 29, p. 380. Ce passage est d'ailleurs supprimé par Ampère dans le tirage à part de cette lettre.

Cette expérience est encore une fois une « expérience théorique » qu'il expose avant d'avoir fait construire l'instrument correspondant, mais tous les détails en sont conçus avec une grande précision.

Un arc de cercle métallique AA' de rayon OG (fig. 53) mobile autour de son milieu O, lui-même mobile grâce à la barre OG, repose sur les augets M et M' remplis de mercure et peut donc prendre n'importe quelle orientation par rapport aux courants fixes MN et M'N'. Le reste du circuit est constitué par un fil souple qui rend cette partie facilement déformable et une pile. Le but de l'expérience est d'étudier l'action de la partie déformable sur l'arc mobile parcouru par le courant.

Ampère affirme que lorsque l'arc AA' a son centre en G, c'est-à-dire lorsqu'il est perpendiculaire à OG, il reste immobile quelle que soit la position de la partie déformable. Au contraire si son centre n'est pas en G, il se déplace sur les augets de mercure, et « le mouvement est augmenté ou diminué » suivant la position du fil souple, ce qui prouve qu'alors l'effet n'est pas dû à la différence entre les forces contraires dues à MN et M'N', mais bien au fil souple (fig. 54).

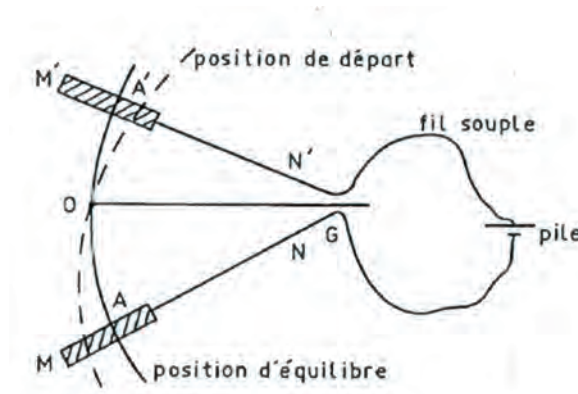


Fig. 54

Ainsi l'action exercée par la partie déformable du circuit, qu'Ampère assimile à un circuit fermé, est perpendiculaire à l'arc AA'.

Cette propriété est valable quelle que soit l'ouverture de l'angle M'GM et donc quelle que soit la longueur de l'arc AA'. Elle l'est donc encore pour tout élément infiniment petit d'un arc de cercle centré sur G.

Cette expérience pose de nombreux problèmes, voici ce qu'il en dit lui-même dans les « Notes » placées à la fin de la première édition de novembre 1826 :

*« L'expérience (...) est peu susceptible de précision à cause du frottement de l'arc AA' sur le mercure contenu dans les augets M, M', et de la difficulté qu'on éprouve à empêcher que la répulsion qui s'établit entre l'arc et le mercure, lorsque le courant électrique les traverse, ne les écarte assez l'un de l'autre pour interrompre la communication »*²⁶.

En effet dans l'appareil d'Ampère, l'arc AA' peut se soulever sous l'action d'une force assez faible, son poids étant équilibré par celui d'un contrepoids Q.

²⁶ *Théorie des phénomènes électro-dynamiques*, 1826, p. 205 et *Coll. Mém.*, t. III, p. 176.

Il faudrait tenter l'expérience pour l'analyser plus complètement, mais il semble a priori que l'équilibre de l'arc mobile AA' soit difficile à réaliser et que dans la mesure où le résultat repose sur l'absence ou la présence d'un mouvement, des frottements rédhibitoires rendent l'expérience difficile à accepter telle quelle ²⁷.

D'après ses contemporains, et d'après Ampère lui-même, il devait d'ailleurs souvent « aider » ses conducteurs mobiles à se mettre en mouvement en tapotant les instruments pour vaincre les frottements !

Dans cette Note I où Ampère critique le nouveau troisième cas d'équilibre, il suggère de reprendre, pour le remplacer, l'expérience de juin 1822 qui montrait qu'un circuit circulaire horizontal ne peut faire tourner autour de son axe vertical un circuit mobile dont les extrémités sont situées sur cet axe (voir chap. IV § III-1).

Cependant comme il le rappelle, « le calcul dont (il) s'était servi pour déduire (la relation entre n et k) supposait établi relativement à chacun des éléments du conducteur circulaire ce que l'expérience démontrait seulement pour la totalité de ce conducteur » ²⁸.

Un nouveau calcul lui permet alors de déduire le résultat cherché d'un cas particulier de cette expérience, celui où le conducteur mobile est un rectangle vertical. Cette démonstration ajoute-t-il « dispense d'avoir recours à l'instrument représenté dans la figure 53, et à l'expérience peu susceptible d'exactitude à laquelle il était destiné » ²⁸.

Mais cette Note I est supprimée dans l'édition (de 1827) des *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* ! Si Ampère a fait preuve d'honnêteté intellectuelle en reconnaissant à la fin de son ouvrage que l'expérience correspondant au 4^e cas d'équilibre n'avait pas été faite, il a craint d'ébranler encore son édifice en présentant ses propres doutes sur l'expérience correspondant au 3^e cas ? ²⁹.

Il faut encore ajouter que de l'expérience qui vient d'être décrite, Ampère tire la conclusion que « l'action d'un *circuit fermé* sur un élément de circuit voltaïque est toujours perpendiculaire à la direction de cet élément ».

Or l'expérience ne prouve le résultat que pour une *portion de circuit* presque fermée sur une autre portion du même circuit. Ceci est d'autant plus important qu'Ampère lui-même a toujours insisté sur la différence fondamentale à faire entre un circuit fermé et un circuit ouvert.

C'est en exprimant la nullité de la composante tangentielle de la force exercée par un circuit fermé quelconque sur un élément de courant qu'il retrouve la relation $2k+n-1=0$.

Après avoir ainsi décrit un nouveau moyen de déterminer les constantes de sa formule, Ampère consacre le reste de son mémoire à de nouvelles applications de cette formule : force exercée par un conducteur rectiligne infini sur une portion finie de conducteur et moment de rotation subi par un conducteur rectiligne fini sous l'action d'un autre conducteur rectiligne fini situé dans le même plan.

Pour ces calculs il reçoit l'aide de J.M. Duhamel, ancien élève de l'Ecole Polytechnique ³⁰.

4. Autres « expériences théoriques ».

Il propose également un nouvel appareil destiné à effectuer des vérifications numériques de sa formule. Malgré ses affirmations méthodologiques de 1822, il n'a donc pas renoncé à la méthode des mesures absolues (voir chap. IV, § III-1).

²⁷ D'après J. Joubert l'expérience a été tentée en 1878, et il a fallu modifier la suspension pour observer nettement le mouvement de l'arc (*Coll. Mém.*, t. III, p. 18).

²⁸ *Théorie...*, 1826, p. 206 et *Coll. Mém.*, t. III, p. 176..1

²⁹ Dans le cours qu'il fait au Collège de France, cette même année 1826-1827, il n'utilise d'ailleurs ni cette expérience ni celle correspondant au 4^e cas d'équilibre, pour établir sa formule. Arch., carton XI, chem. 213. (Cours manuscrit de Liouville annoté de la main d'Ampère).

³⁰ *Correspondance*, t. II, p. 681, 684.

Cette expérience qui n'était pas encore réalisée lors de la parution de la *Théorie des phénomènes électrodynamiques*, ne le fut sans doute jamais.

Elle devait permettre de mesurer la période des oscillations d'un conducteur mobile en secteur de cercle sous l'action d'un conducteur fixe également en secteur de cercle (fig. 55).

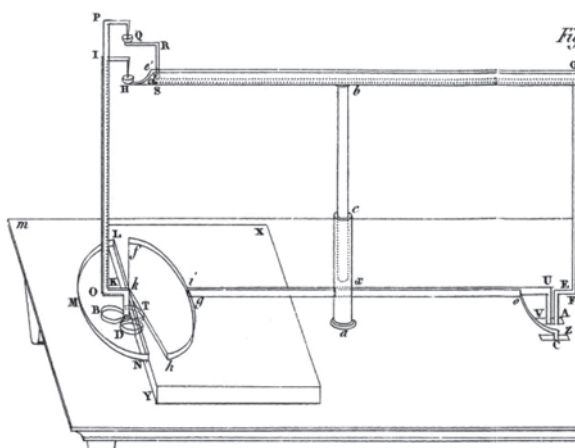


Fig. 55

Théorie mathématique, pl. 2, fig. 20

Elle est décrite plus complètement dans le mémoire lu le 21 novembre 1825 et publié dans la *Correspondance mathématique et physique des Pays-Bas* ³¹.

Dans ce mémoire apparaît la quatrième expérience fondamentale permettant de déterminer le coefficient n dans l'ouvrage de 1826.

Jusqu'alors Ampère avait utilisé, pour montrer que $n = 2$, l'expérience de Gay-Lussac et Welter sur la nullité d'action d'un anneau aimanté. Mais une présentation cohérente de sa théorie exige qu'il utilise seulement des circuits et non des aimants dont les propriétés sont des conséquences de cette théorie.

L'appareil destiné à ce 4^e cas d'équilibre resta lui aussi, au stade de la gravure sur planches. Il comporte trois conducteurs circulaires homothétiques, dans un même plan, les deux extrêmes étant fixes et l'intermédiaire mobile (fig. 56).

Ampère affirme que le cercle mobile est en équilibre sous l'action des deux autres cercles. En fait l'expérience est encore plus délicate que celle où l'arc mobile devait se déplacer sur les augets de mercure.

Elle prouve que la force entre deux circuits reste la même si toutes les dimensions sont multipliées par un même facteur ³².

Cet équilibre implique, montre Ampère, que $n = 2$. Et il conclut, dans le mémoire de novembre 1825 :

« Pour que les lois de l'action électrodynamique fussent démontrées *par les faits seuls* et d'une manière indépendante de toute hypothèse, *il serait bien à désirer que cette expérience fût faite* avec un instrument susceptible de toute la précision qu'on peut désirer »³³.

31 *Correspondance mathématique et physique*, t. II, 1826, p. 35-47. Le mémoire fut également publié à part; il est reproduit dans la *Coll. Mm.*, t. III, p. 203-216, qui donne en outre un texte publié d'après un manuscrit de l'Académie des Sciences (p. 194-202).

32 Une expérience fondée sur cette propriété a été réalisée récemment par R.A.R. TRICKER, (*Early Electrodynamics*, 1965, p. 46-47).

33 *Coll. Mém.*, t. III, p. 206.

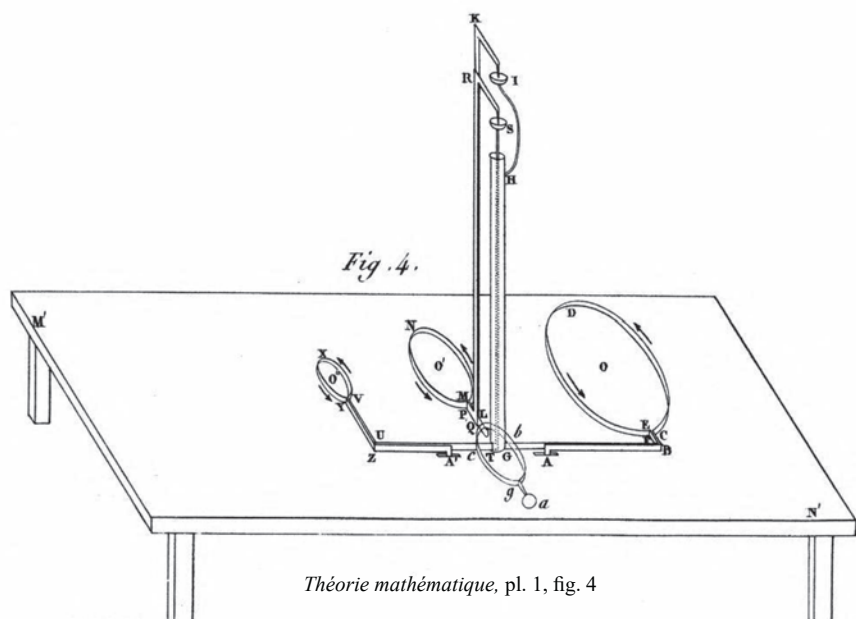


Fig. 56

Mais dans le tout dernier paragraphe de la *Théorie des Phénomènes électrodynamiques*, il reconnaît n'avoir pas encore eu le temps de construire l'appareil !

5. L'équivalence « circuit-feuillet magnétique » et les « lignes d'aimantation »

Plus importantes, et surtout plus originales par rapport au reste de son œuvre, sont la démonstration de ce qui fut appelé plus tard « l'équivalence circuit-feuillet » et les conclusions hardies qu'en tire Ampère.

C'est en étudiant l'action d'un circuit fermé plan dont les dimensions sont petites devant la distance à laquelle on observe son action, qu'il est amené à comparer cette action à celle d'un élément magnétique.

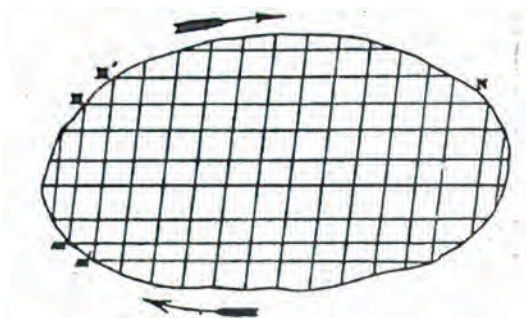
La première remarque est que l'action de ce petit circuit est indépendante de sa forme et ne dépend que de sa surface (remarque qui sera reprise ultérieurement dans la théorie du magnétisme) ; mais surtout qu'on peut remplacer ce petit circuit par un élément magnétique (c'est-à-dire un aimant élémentaire) perpendiculaire à sa surface.

Pour que les lois soient identiques, il suffit que cet élément magnétique coupe la surface du circuit en son centre d'inertie et possède une intensité magnétique liée au courant dans le circuit par une relation de proportionnalité constante entre

$$\frac{\mu \delta p}{\lambda} \text{ et } i,$$

où μ est « la force magnétique » de l'élément magnétique,
 δp est sa longueur,
 λ est la surface du petit circuit qu'il remplace.

Or un circuit fermé plan quelconque peut être divisé en circuits infiniment petits par des courants fictifs tels que les côtés des circuits soient deux à deux communs et de sens contraires (fig. 57).



Théorie mathématique, pl. I, fig. 16

Fig. 57

L'action de cet ensemble de circuits se réduit à celle des côtés qui ne sont pas deux à deux opposés, c'est-à-dire au circuit initial.

Plus généralement, on peut remplacer un circuit (C) non plan par une surface s'appuyant sur ce circuit, surface tapissée de circuits infiniment petits dont chacun est équivalent à un élément magnétique.

La démonstration complète de cette équivalence n'est toutefois donnée que dans le Mémoire de 1826³⁴. Le circuit (C) est donc équivalent à un ensemble d'éléments magnétiques de même intensité (les circuits élémentaires ayant la même surface), « également espacés » et perpendiculaires à chaque petit circuit en son centre d'inertie.

Cette équivalence étant valable pour toute surface limitée par (C), Ampère en déduit, avec une intuition étonnante :

« On peut considérer l'action que (le circuit) exerce comme due à des éléments magnétiques, disposés dans l'espace suivant des *lignes d'aimantation* qui coupent partout à angles droits les surfaces dont nous venons de parler »³⁴.

En fait le circuit (C) étant équivalent à *un seul* feuillet magnétique, pour le remplacer par une infinité de feuillets comme le suggère la phrase précédente, il faudrait préciser la loi de répartition de la puissance magnétique entre tous ces feuillets. Ce qu'Ampère ne fait pas.

En outre, on peut définir une infinité de réseaux de surfaces s'appuyant sur (C), or Ampère semble n'en envisager qu'un seul. Il ne peut s'agir, à notre avis, que du plus simple, celui qui correspond à une distribution magnétique en équilibre stable dans laquelle tout élément magnétique est en équilibre sous l'action du reste de la distribution.

Dans ce cas il est d'ailleurs inutile de supposer l'existence d'une force coercitive sur les éléments magnétiques ; c'est donc le réseau de surfaces le plus « naturel », et sans doute celui auquel Ampère pensait implicitement.

Les « lignes d'aimantation » évoquées par Ampère sont alors tout simplement les lignes du champ magnétique créé par le circuit (C), et les surfaces des feuillets sont les équipotentielles de ce champ (fig. 58).

³⁴ *Coll. Mém.*, t. III p. 11 8-133. Ampère reprend la question des feuillets magnétiques à plusieurs reprises : p. 163-169, 197-201 211-216, 231-236. Ce théorème qui est peu utilisé aujourd'hui était encore exposé dans les ouvrages d'électricité des années 1950 (par exemple G. BRUHAT, *Cours de physique générale*, Electricité, 1959, p. 365-366).

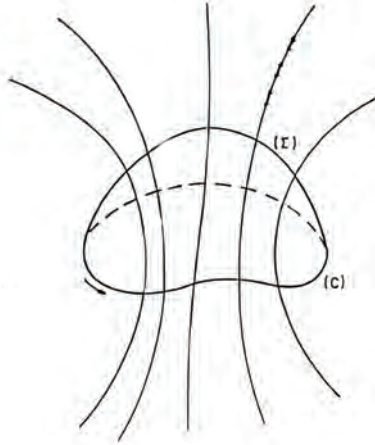


Fig. 58

Rappelant que cette équivalence est indépendante du fait qu'on attribue le magnétisme à des éléments magnétiques, comme Coulomb et Poisson, ou à des circuits fermés infiniment petits, il émet une conclusion — ou une hypothèse ?— encore plus hardie :

« On ne peut guère se dispenser d'en conclure, dans les deux manières d'expliquer les phénomènes que présentent les conducteurs voltaïques, *que l'action exercée par ces conducteurs est produite par la formation, dans l'espace environnant, des éléments magnétiques dont je viens de parler* ; surtout si l'on se rappelle une expérience que j'ai faite à Genève en 1822 »³⁵. L'expérience en question ne peut être que celle concernant la tentative de création de courants par influence.

Il ne s'agit plus seulement d'une équivalence mathématique, mais bien d'une modification de la structure même de l'espace sous l'action d'un courant électrique. Cette distribution d'éléments magnétiques lui permet en outre de déduire ce qu'on appelle aujourd'hui la « règle du flux maximal » selon laquelle un circuit est en équilibre stable lorsque, compte-tenu des liaisons qui lui sont imposées, le flux qui le traverse est maximal :

« Quand une partie de circuit voltaïque est mobile séparément (..), il est aisé de voir que la répulsion mutuelle des éléments magnétiques normaux aux surfaces qui ont pour contour le circuit total, y compris la pile, *doit tendre à le dilater en établissant une répulsion, apparente si l'on veut* » entre ses parties³⁶.

Ampère songeait sans doute en écrivant ces lignes à l'autre expérience faite à Genève en 1822 sur la répulsion des diverses parties d'un même circuit (voir chap. IV § IV-2).

Cette répulsion des éléments magnétiques qui fait se déplacer une partie mobile pour « dilater » le circuit, modifie la courbe sur laquelle s'appuyaient les surfaces des feuillets magnétiques et en conséquence, d'après Ampère, « il se forme de nouveaux éléments magnétiques dans l'espace environnant, en sorte, que les *forces attractives et répulsives qui en émanent dépendent du temps* : ce qui suffit, comme on sait

³⁵ Coll. Mém., t. III, p. 214. Ce passage n'est pas repris dans la *Théorie des phénomènes électro-dynamiques*. Dans une note Ampère remarque simplement que l'identité des effets produits par les aimants et par les circuits fermés « a lieu aussi pour les circuits d'une grandeur quelconque puisque nous avons vu que ceux-ci peuvent être remplacés par des éléments magnétiques distribués uniformément sur des surfaces terminées sur ces circuits et qu'on peut multiplier à volonté le nombre des surfaces que circonscrit un même circuit. *L'ensemble de ces surfaces peut être considéré comme un faisceau d'aimants équivalents au circuit* ». (Coll. Mém., t. III, p. 170). ,

³⁶ Coll. Mém., t. III, p. 215.

pour qu'il n'y ait plus lieu au principe de la conservation des forces vives, tel qu'on le conçoit communément »³⁷

Ainsi est résolu le paradoxe de ces rotations continues sans conservation des forces vives. Après avoir justifié cette violation d'un principe fondamental de la mécanique par l'intervention des angles dans sa formule élémentaire, il l'explique maintenant par la dépendance des forces en fonction du temps.

Il ne faudrait cependant pas croire qu'Ampère réhabilite par l'utilisation d'éléments magnétiques la théorie magnétique de Coulomb et Poisson : s'il a raisonné en termes d'éléments magnétiques c'est par commodité de langage ; la réalité des phénomènes ne peut s'expliquer qu'en termes de courants.

La création d'éléments magnétiques signifie en fait la création de circuits infiniment petits. Et Ampère précise encore l'origine de ces courants électriques :

« Le courant électrique du fil conducteur doit imprimer aux particules de fluide neutre répandues dans l'espace *un mouvement de rotation qui se propage de proche en proche* suivant les surfaces dont je viens de parler, et il résulte autant de courants électriques infiniment petits qu'il y a de ces particules, puisqu'elles sont chacune composées de molécules d'électricité positive et de molécules d'électricité négative »³⁷.
Curieuse philosophie newtonienne !

Ampère affirme sa conviction intime que les phénomènes électromagnétiques sont dus à une modification du milieu qui se propage de proche en proche et non à une action instantanée à distance comme la force d'attraction gravitationnelle. Mais il ne possède pas de modèle mathématique, ce dont il exprime à plusieurs reprises le regret, pour traduire une telle interprétation physique.

Les fondements de la physique newtonienne ne sont pas encore remis en cause, cependant ce passage ne figure pas dans l'exposé de sa théorie de 1826 !

Dans la *Théorie des phénomènes électrodynamiques*, Ampère reprend l'étude de l'équivalence feuillet-circuit et en modifie légèrement la définition :

Le feuillet est constitué par deux surfaces infiniment voisines sur lesquelles sont répartis les fluides magnétiques opposés, ceux-ci étant retenus par une force coercitive.

Cette intervention de la force coercitive est nouvelle et indispensable pour maintenir séparés les fluides opposés mais c'est sans doute en partie à cause d'elle qu'il renonce à toute allusion aux « lignes d'aimantation » et à la création d'éléments magnétiques dans l'espace autour d'un circuit.

En effet quelle pourrait être l'origine d'une telle force coercitive dans le vide (même rempli d'éther) ?

L'équivalence circuit-feuillet a, dans son exposé, pour principale utilité de démontrer l'impossibilité d'obtenir une rotation continue par l'action mutuelle de deux circuits fermés.

En effet les forces de Coulomb entre les feuillets magnétiques équivalents étant seulement fonction de la distance entre les points où elles s'exercent, « il est reconnu par tous les mathématiciens que de telles forces ne peuvent jamais produire de mouvement avec accélération continue, autour d'axes ou de points fixes quelconques »³⁸.

Ceci entraîne par là même que la théorie de Coulomb-Biot des fluides magnétiques est *mathématiquement* incapable de rendre compte des rotations continues qui existent lorsqu'un des circuits possède une partie mobile.

³⁷ Coll. Mém., t. III, p. 216. Ce texte très original dans l'œuvre d'Ampère n'a pas été remarqué par ses contemporains sans doute à cause de la faible diffusion de la revue dans laquelle il a été publié.

³⁸ Coll. Mém., t. III, p. 245.

6. La question du « couple primitif »

Il est donc impossible d'expliquer les phénomènes électromagnétiques par des forces entre fluides magnétiques. Mais il existe une variante de la théorie de Coulomb qu'Ampère voudrait réfuter de manière aussi définitive, c'est la formulation de Biot et Pouillet.

Dans cette formulation, la « force élémentaire » est celle qui s'exerce entre un élément de courant et un pôle magnétique. Elle ne satisfait pas au principe de l'action et de la réaction puisque les forces qui s'exercent, l'une sur l'élément de courant, et l'autre sur le pôle magnétique, sont égales et opposées et forment donc un couple, le « couple primitif ».

Ampère croit tenir une preuve expérimentale contre cette hypothèse du couple primitif dans l'étude de l'expérience de Faraday sur la rotation d'un aimant autour d'un conducteur :

La rotation est identique que l'aimant soit recouvert d'un vernis isolant, empêchant les courants du mercure de le traverser, ou non. Les courants traversant un aimant sont donc sans action sur ses propres particules. Or dans l'hypothèse de Biot un courant ayant lieu dans un aimant pourrait y créer un mouvement, ce qui est contraire au résultat de l'expérience.

En fait l'hypothèse du couple implique la rotation d'une molécule magnétique autour d'un courant mais non la rotation de l'ensemble de l'aimant.

Le véritable argument contre cette hypothèse du couple primitif est en fait d'un autre ordre. Il est ainsi énoncé par Ampère :

« L'action mutuelle des diverses parties d'un système de forme invariable ne peut, dans aucun cas, imprimer à ce système un mouvement quelconque ; *principe qui n'est qu'une conséquence de l'idée même que nous avons des forces et de l'inertie de la matière* »³⁹.

Cette « idée » que nous nous faisons d'après les phénomènes macroscopiques peut-elle être transposée au monde de l'infiniment petit ?

Déjà à cette époque Schiller et ses émules s'opposaient à une telle transposition, mais Ampère n'en met pas en doute la validité. Sans doute pour lui, les lois de la nature doivent-elles fonctionner sur le même modèle que celles de notre esprit, et un physicien ne peut accepter un principe contraire à ces lois.

Il revient d'ailleurs sur ce problème du couple primitif dans un mémoire présenté à l'Académie Royale de Bruxelles le 28 octobre 1826 et publié dans les *Mémoires* de cette Académie⁴⁰, mais qui fut rédigé au début de 1826, c'est-à-dire pendant qu'il terminait la rédaction de la *Théorie des phénomènes électrodynamiques*.

Il y démontre l'équivalence mathématique entre son hypothèse et celle de Biot pour des circuits fermés, à l'aide des feuillets magnétiques et des formules données par Poisson dans son mémoire sur la théorie du magnétisme de 1824.

³⁹ *Coll. Mém.*, t. III, p. 156. Il faut rappeler que dans l'esprit d'Ampère, « les molécules des fluides impondérables ne peuvent agir que comme celles des corps pondérables » (*Ibid.*, p. 253) bien que leur inertie ne soit pas appréciable.

⁴⁰ *Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale de Bruxelles*, t. IV, 1827, p. 1-70. « Mémoire sur l'action mutuelle d'un conducteur voltaïque et d'un aimant » et « Lettre à M. le docteur Gherardi », p. 71-78. Le mémoire fut tiré à part puis en partie reproduit dans les *A.C.P.*, t. 37, 1828, p. 113, cette partie elle-même tirée à part sous le titre *Note sur l'action mutuelle d'un aimant et d'un conducteur voltaïque*, 1828. D'après Colladon, en 1826, Ampère était en froid avec Arago, coéditeur des *A.C.P.*, à cause d'expériences sur le magnétisme de rotation qui reproduisaient celles d'Arago en remplaçant les aimants par des solénoïdes. Arago aurait alors fait des difficultés pour publier les mémoires d'Ampère, et celui-ci se tourna vers l'Académie de Bruxelles dont il avait été nommé correspondant le 8 octobre 1825 (voir J.D. COLLADON, *Souvenirs et mémoires*, 1893 et A. QUETELET, « Notice sur Ampère », dans *Annuaire de l'Académie Royale de Bruxelles*, 1837, t. 3, p. 134-136).

Pour les « circuits ouverts » qui donnent lieu aux rotations continues il maintient la supériorité de sa formule tout en calculant plusieurs moments de rotation à l'aide de celle de Biot ⁴¹.

III LE COURANT ÉLECTRIQUE

Si, dans son premier mémoire publié en 1820, nous avons vu Ampère faire appel à la théorie de Volta du courant électrique et affirmer l'existence dans le fil conducteur d'un double courant l'un d'électricité positive, et l'autre d'électricité négative, il ne s'y est pas tenu longtemps.

La référence à Volta ne lui sert plus guère qu'à défendre sa propre théorie vis-à-vis de celles des autres physiciens.

Ainsi dans sa réfutation des idées de Wollaston qu'il fait pour Faraday en juillet 1822 :

« Quand même les phénomènes s'expliqueraient également bien dans les deux cas (sa théorie et celle de Wollaston qui supposait des courants électromagnétiques circulaires autour de l'axe du conducteur), la mienne serait préférable comme s'accordant avec la théorie de Volta sur l'instrument qui porte son nom : théorie qui montre comment *les deux électricités doivent se porter en sens opposés le long du conducteur* d'une extrémité de la pile à l'autre » ⁴².

Sans doute Ampère avait-il lu, entre 1813 et 1820, l'ouvrage d'Ørsted, *Recherches sur l'identité des forces chimiques et électriques*, mais la théorie du « conflit électrique », élaborée par Ørsted dès 1806 (voir chap. I § II-2) n'était plus très nette dans son esprit ⁴³.

Il l'a certainement relu après la découverte de l'électromagnétisme car dès le 15 mai 1821, il explique à G. de La Rive l'échec de H. Davy à obtenir une action de l'aimant sur la décharge continue de l'arc électrique dans des termes voisins de ceux d'Ørsted : « la série de décompositions et de recompositions du fluide formé par la réunion des deux électricités dont on regarde les courants électriques comme composés, ne se (fait) que par des décharges successives à travers l'air, et non d'une manière continue comme dans un fil conjonctif, parce que l'air est le plus mauvais de tous les mauvais conducteurs » ⁴⁴.

Un peu plus tard il écrit à Van Beck que l'opinion du « grand physicien » Ørsted sur les décompositions et recompositions de l'électricité qui, par les vibrations qu'elles provoquent dans le fluide neutre, sont aussi à l'origine de la chaleur et de la lumière, « s'accorde parfaitement avec l'ensemble des phénomènes » ⁴⁵.

Mais c'est dans le mémoire lu le 5 janvier 1824 qu'Ampère développe vraiment sa théorie du courant électrique. Cette partie du mémoire fut seulement résumée lors de sa publication et nous nous appuyerons essentiellement sur le texte très riche fourni par l'Abbé Moigno, publié en Annexe III : « Sur le mode de transmission des courants électriques et la théorie électrochimique » qui fut rédigé par Ampère, sans doute vers 1824-1825, à partir de ce mémoire.

Le premier intérêt de ce texte est la mise en évidence par Ampère de la difficulté d'appliquer les lois de l'électrostatique à l'échelle moléculaire.

Il y reprend l'hypothèse déjà exposée en 1822 dans sa lettre à Van Beck selon laquelle chaque molécule d'un corps simple possède une électricité propre, positive pour les corps électropositifs (hydrogène, métaux, oxydes...) et négative pour les corps électro-négatifs (fluor, chlore, oxygène, acides ...).

⁴¹ Coll. Mém., t. III, p. 246. L'expérience d'Ørsted est ainsi analysée en détail p. 269-274.

⁴² Correspondance, t. II, p. 587.]

⁴³ Correspondance, t. II, p. 587.

⁴⁴ Recueil, p. 122, et Bibliothèque Universelle, t. 17, 1821, p. 193.

⁴⁵ Journal de Physique, t. 93, 1822, p. 450 et Coll. Mém., t. II f, p. 216.

Cette électricité propre décompose le fluide neutre environnant pour s'entourer d'une couche d'électricité contraire formant ainsi un condensateur parfait sans action à l'extérieur.

Or, pour que cette « atmosphère électrique » entourant la particule soit électriquement stable, il faut, montre Ampère, que son épaisseur soit infiniment petite, alors que « cette couche a au moins une épaisseur comparable à la distance des particules et des atomes » ⁴⁶.

Devant cette contradiction inhérente à l'électrostatique, Green puis ses successeurs choisiront de considérer des charges réparties sur une surface mathématique d'épaisseur nulle, ne décrivant ainsi que l'aspect macroscopique des phénomènes. Ampère qui pour sa part veut prendre en compte la réalité des phénomènes à l'échelle microscopique en conclut au contraire que « les atomes des fluides électriques réagissent les uns sur les autres à *des distances très petites*, suivant une autre loi que celle de la raison inverse du carré des distances » ⁴⁶.

C'est une nouvelle faille dans le schéma newtonien, même s'il peut arguer de l'analogie avec l'abandon de l'attraction gravitationnelle à l'échelle moléculaire dans la théorie de l'action capillaire.

Avec cette hypothèse de l'électricité propre inhérente aux molécules et de leurs atmosphères d'électricité opposée, Ampère veut expliquer la conduction de l'électricité ainsi que les combinaisons chimiques et leurs destructions dans l'électrolyse.

Le mécanisme qu'il propose pour la conduction de l'électricité dans les métaux est celui proposé par Ørsted en 1806.

Il étudie d'abord l'expérience d'influence électrostatique d'un corps neutre par un corps chargé qu'il explique par une série de décompositions et de recompositions du fluide neutre se propageant le long du corps.

La définition d'un corps conducteur s'en trouve modifiée : ce n'est plus le corps qui laisse se déplacer facilement le fluide électrique en son intérieur mais celui qui oppose « le moins d'obstacles à la séparation et à la réunion des deux fluides dans (son) intérieur » ⁴⁷.

Notons aussi cette vision de la structure des métaux qui évoque le nuage électronique :

« toutes les atmosphères électro-négatives (...) réagiront les unes sur les autres, de sorte qu'il y aura une certaine quantité d'électricité négative distribuée d'une manière continue entre les atomes, plus intense seulement près de ces atomes » ⁴⁸

Les combinaisons chimiques qui lient deux molécules différentes sont expliquées par une neutralisation partielle (ou totale) des atmosphères lorsque les corps sont de nature contraire et par une mise en commun, difficile d'ailleurs à comprendre, lorsque les corps sont tous deux électropositifs ou tous deux électronégatifs.

Cette mise en commun des atmosphères autour de deux molécules de métaux d'électropositivités différentes implique en outre que le plus électropositif (le zinc, si par exemple on met en contact du zinc et du cuivre) possède dans la réunion une atmosphère négative insuffisante à « dissimuler » (c'est-à-dire à neutraliser à l'extérieur) sa charge propre.

⁴⁶ Annexe III, p. 178.

⁴⁷ Annexe III, p. 179. +

⁴⁸ Annexe III, p. 178. Cette affirmation sur la structure des métaux est reprise dans la *Théorie des Phénomènes électrodynamiques* : « Pour se faire une idée nette de ce qui se passe dans le fil conducteur, il faut faire attention qu'entre les molécules métalliques dont il est composé est répandu un fluide composé de fluide positif et de fluide négatif, non pas dans les proportions qui constituent le fluide neutre, mais avec un excès de celui de ces deux fluides qui est de nature opposée à l'électricité propre des molécules du métal, et qui dissimule cette électricité (...) : c'est dans ce fluide électrique intermoléculaire que se passent tous les mouvements, toutes les décompositions et recompositions qui constituent le courant électrique » (*Coll. Mém.*, t. III, p. 115). Il existe dans les Archives de l'Académie des Sciences plusieurs textes non autographes qui développent cette théorie du courant électrique : carton X, chemise 189 et carton XIV, chemise 250.

Le zinc se charge donc positivement tandis que le cuivre qui gagne un excès d'atmosphère se charge négativement.

Ainsi peut-on comprendre la phrase quelque peu obscure du résumé du mémoire dans les *Annales de Chimie et de Physique* : « l'action électro-motrice qui a lieu entre deux métaux en contact consiste dans une réunion, et non dans une séparation, comme on le croyait jusqu'ici des deux fluides électriques »⁴⁹. Ampère maintient donc la tradition des interprétations purement électrostatiques du fonctionnement de la pile.

Le liquide conducteur qui relie le zinc et le cuivre ne joue aucun rôle. En particulier les modifications chimiques qui se produisent au sein de la pile ne sont que des phénomènes parasites.

La pile est un instrument idéal qui, comme les rotations continues, est en dehors, des cadres conceptuels de la mécanique newtonienne. Ainsi les électricités par le contact « sont produites avec une *vitesse qui est comme infinie* relativement à celle avec laquelle elles peuvent traverser l'eau acidulée pour s'y réunir »⁵⁰, affirme Ampère dans la Note qu'il lit à l'Académie des Sciences le 12 avril 1824.

En outre cette mise en commun des atmosphères qui se reproduit au fur et à mesure du processus par la décomposition du fluide neutre environnant ne nécessite aucun travail : il n'y a pas de déplacement du point d'application d'une force.

Lors de l'électrolyse d'une solution, il se produit une chaîne de décompositions et de recompositions entre molécules voisines, d'une électrode à l'autre. Ampère suit ici la théorie de Grotthus émise en 1806⁵¹.

La théorie du courant électrique d'Ampère se fonde donc d'une part sur une théorie classique, celle du contact (pas de rôle chimique du liquide) qu'il adapte à sa conception de la structure moléculaire des métaux et d'autre part une théorie non-classique, celle d'une propagation ondulatoire sans transport de fluide dans le conducteur.

Quel que soit cependant le processus physique à l'échelle microscopique nommé « courant électrique », il en a fourni la mesure, à la fois théorique et pratique :

- théorique : l'intensité du courant est « ce qu'il passe d'électricité en temps égaux »⁵², c'est-à-dire le débit d'électricité dans le conducteur,
- pratique : cette intensité est mesurée par le rapport des forces exercées par un courant de référence sur deux portions égales des deux courants à comparer.

IV. LES DERNIÈRES VERSIONS DE LA THÉORIE DU MAGNÉTISME

En 1822, Ampère attribuait les propriétés apparaissant lors de l'aimantation de l'acier à une orientation d'ensemble de courants particuliers, liés à la matière et préalablement disposés de façon aléatoire dans l'espace, sous l'action de courants extérieurs, dus eux-mêmes à des aimants ou à des circuits électriques (voir chap. IV § II).

En 1823 le succès mathématique de Savary qui a montré que les lois de Coulomb et de Biot sont des conséquences mathématiques de celle d'Ampère l'incite à faire la comparaison définitive des deux théories sur le magnétisme : fluides ou courants ? ;

49 *A.C.P.*, t. 25, 1824, p. 89 (Résumé du mémoire lu le 5 janvier 1824).

50 AMPÈRE ET BECQUEREL, « Note sur une expérience relative à la nature du courant électrique », dans *A.C.P.*, t. 27, 1824, p. 30

51 « Mémoire sur la décomposition de l'eau et des corps qu'elle contient en dissolution à l'aide de l'électricité galvanique », dans *Annales de Chimie*, t. 58, 1806, p. 54-74.

52 Voir chap. III, p. 92.

Il résume d'abord, dans la « Note relative au mémoire de Savary », les raisons *physiques* à la base de sa critique de la théorie des deux fluides :

« On y suppose des molécules de deux fluides particuliers auxquels on attribue les propriétés d'attraction et de répulsion semblables à celles des fluides électriques, propriétés qui ne sont démontrées à l'égard de ces derniers que *parce qu'on peut les séparer en les faisant passer dans des corps différents, ce qu'on ne peut faire pour les fluides hypothétiques*, que des analogies plus spécieuses que solides entre les phénomènes magnétiques et ceux que présentent les corps électrisés, ont fait admettre dans les aimants »⁵³.

En outre la théorie de Coulomb implique une neutralisation entre les deux molécules de fluides opposés appartenant à deux éléments magnétiques immédiatement voisins, « neutralisation si difficile à concilier avec la distance que l'ensemble des phénomènes des autres branches de la physique oblige à admettre entre ces particules »⁵⁴.

Cependant la preuve en faveur de sa théorie est dorénavant d'un autre ordre. Les mémoires de Savary et d'Ampère lui-même montrent que les cylindres électrodynamiques exercent les mêmes forces que les éléments magnétiques. « Ainsi, conclut Ampère, on ne peut chercher dans ces calculs, dans ces explications, ni objections contre ma théorie, ni preuves en ma faveur. Les preuves sur lesquelles je l'appuie résultent surtout de ce *qu'elle ramène à un principe unique trois sortes d'actions que l'ensemble des phénomènes prouve être dues à une cause commune et qui ne peuvent y être ramenées autrement* »⁵⁵.

1. Hypothèse des solénoïdes rectilignes

Encore faut-il préciser dans cette théorie comment se répartissent les courants dans les aimants. Nous allons voir que les idées d'Ampère à ce sujet ont changé plusieurs fois. Après que Savary eut montré l'équivalence entre un cylindre électrodynamique et un élément magnétique, Ampère propose de remplacer les filets d'éléments magnétiques de Coulomb par des séries de cylindres électrodynamiques infiniment petits parallèles à l'axe de l'aimant.

Une série de tels cylindres disposés suivant une même ligne est alors équivalente à un seul cylindre de la longueur de l'aimant⁵⁶.

C'est là, sous une autre forme, et obtenue de façon différente, l'hypothèse de 1822 sur les courants circulaires (chap. IV & II-3) dans des plans perpendiculaires à l'axe.

La seule différence tient dans l'inclinaison de ces courants par rapport à l'axe de l'aimant vers ses extrémités qui n'apparaît plus ici. Cette inclinaison ne paraît plus aussi certaine et Ampère appelle de ses vœux des « expériences de mesure précise » qui permettent de choisir entre cette hypothèse et celle des courants d'intensité variable le long de l'aimant.

2. Hypothèse des solénoïdes toriques

En décembre 1823, Ampère impose une condition beaucoup plus stricte aux circuits qui doivent être les équivalents des éléments magnétiques : être *avant* l'aimantation « sans action sur d'autres éléments de courants, *quelles qu'en soient les distances et les positions relatives* »⁵⁷.

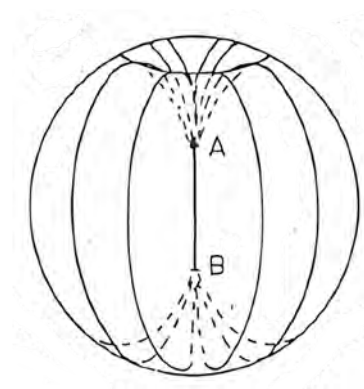
⁵³ *Recueil*, p. 357 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 378.

⁵⁴ *Recueil*, p. 359 et *Coll. Mém.*, t. II, p. 380.

⁵⁵ *A.C.P.*, t. 26, 1824, p. 249 (Mémoire du 22 décembre 1823).

⁵⁶ L'hypothèse des solénoïdes droits est signalée dans l'« Addition au mémoire de Savary » (lu le 3 février 1823) (*Recueil* p. 359) cf dans le *Bulletin des Sciences de la Société Philomatique de Paris*, 1824, p. 84.

⁵⁷ « Extrait d'un mémoire sur les phénomènes électro-dynamiques » (22 décembre 1823), dans *A.C.P.*, t. 26, p. 247.



Solénoïde torique

Fig. 59

Or les solénoïdes droits ne remplissent pas cette condition. Seul « le solénoïde fermé et homogène », c'est-à-dire le solénoïde torique la remplit, puisqu'il n'a aucune action à l'extérieur (fig. 59).

Il reste alors à concevoir comment ces solénoïdes toriques peuvent, lors de l'aimantation devenir équivalents à des éléments magnétiques, c'est-à-dire, pour chacun, à « un solénoïde homogène et non fermé, dont les extrémités sont situées précisément aux mêmes points où l'on supposerait placées les molécules des deux fluides »⁵⁸.

Cette « ouverture » du solénoïde fermé est difficilement conciliable avec la stabilité de la matière, support de ces courants, lors de l'aimantation.

Ampère résout le problème en émettant l'hypothèse d'une déformation continue du solénoïde torique : « Parmi les différentes manières dont on peut se représenter la disposition des courants électriques circulaires autour des particules des métaux susceptibles d'aimantation (...), une des plus simples consiste à considérer chaque particule comme une petite pile de Volta dont les courants, entrant par une extrémité de la particule et sortant par l'extrémité opposée, reviennent, à travers l'espace environnant, à la première de ces deux extrémités, et forment ainsi un solénoïde fermé qui, d'après ce qui précède, ne peut exercer aucune action tant que ses courants sont de même intensité et équidistants (...).

Lorsqu'un fil conducteur ou un barreau aimanté vient à agir sur ces courants, ils doivent être déplacés et s'accumuler en plus grand nombre sur le côté de la particule vers lequel ils sont portés par cette action ; alors on peut considérer le solénoïde hétérogène qui en résulte comme un assemblage de solénoïdes homogènes partiels, dont l'un soit fermé et ait pour intensité celle du solénoïde hétérogène au point où il en a le moins et dont les autres ne soient pas fermés ; ces derniers alors en produisent chacun deux forces qu'on peut considérer comme émanant de leurs extrémités »⁵⁹.

Ce complexe « modèle électrodynamique » de l'aimantation est pour Ampère une conséquence de ses calculs sur les solénoïdes ; il n'est pas du tout un fondement de sa théorie et n'est, comme il le reconnaît lui-même qu'« une des plus simples » parmi les différentes dispositions possibles des courants dans les aimants. Ce modèle est d'ailleurs modifié au gré des nouvelles conséquences théoriques. Ainsi lorsqu'en novembre 1825, Ampère montre que l'action d'un circuit plan ne dépend que de sa surface et de son orien-

⁵⁸ *Ibid.*, p. 248.

⁵⁹ *A.C.P.*, t. 26, p. 253. On peut objecter à Ampère que son calcul sur les cylindres électro-dynamiques supposait que les rayons des cercles soient petits devant la longueur de la ligne qui joint leurs centres (voir § II-1) ; or cette condition n'est pas réalisée ici puisque si R est le rayon des cercles formant le tore, la longueur de la ligne des centres est $2\pi R$. Ce modèle des solénoïdes toriques est celui qui a retenu l'attention dans les études sur Ampère, en particulier celles de R.A.R. Tricker et L.P. Williams.

tation (et pas de sa forme) lorsqu'on regarde son action à une distance grande devant ses dimensions, il en conclut qu'il n'est plus nécessaire de supposer les circuits des aimants (les cylindres électrodynamiques) de forme circulaire.

Cette généralisation est bien venue, car, reconnaît-il dans une lettre à Faraday du 25 octobre 1825 : « il y avait, en effet, quelque difficulté à supposer que les courants que j'admets autour des particules des aimants étaient exactement circulaires » !⁶⁰.

3. Abandon des solénoïdes toriques et de l'hypothèse des courants préexistants

Mais ce modèle des solénoïdes toriques disparaît complètement après la découverte de l'équivalence feuillet-circuit.

En effet un « circuit plan infiniment petit peut toujours être remplacé par un très petit aimant dont les deux pôles se trouvent sur une normale à (ce) plan et à égale distance de ce plan »⁶¹.

Il suffit alors de remplacer les éléments magnétiques de Poisson par des circuits infiniment petits pour retrouver l'hypothèse de 1822 qu'il résumait alors ainsi au baron Maurice :

« Les aimants agissent dans tous les cas comme si leurs particules étaient entourées d'un courant électrique dont le plan fût perpendiculaire à l'axe de l'aimant pour toutes les particules qui sont dans l'axe lui-même, mais incliné sur la direction de cet axe dans le sens où tend à les incliner l'action mutuelle de tous les courants de l'aimant » pour les autres particules⁶².

Plus précisément, il faut désormais considérer l'aimant comme « un faisceau de solénoïdes » dirigés suivant les lignes d'aimantation intérieures à l'aimant⁶³.

C'est un retour au modèle des solénoïdes droits de 1823. Ampère développe peu ce nouveau modèle qui représente bien la structure de l'aimant *après* l'aimantation.

On pourrait lui reprocher de ne pas satisfaire à la condition très sévère qu'il imposait en 1824 aux circuits des aimants, à savoir n'avoir aucune action, *à quelque distance que ce soit, avant* l'aimantation. Même une disposition aléatoire des petits solénoïdes dans l'acier ne peut assurer cette condition.

Mais cette critique devient nulle et non avenue compte tenu du deuxième revirement d'Ampère concernant cette fois *le mécanisme même* de l'aimantation.

On se souvient qu'en 1821, il avait longuement hésité entre l'hypothèse de l'orientation de courants préexistants et celle de la création de ces courants par influence, pour se rallier finalement à la première.

En 1825, il renonce à ce choix fondamental et auquel il était très attaché. Il vient en effet de conclure que l'action magnétique d'un courant est due à la formation dans l'espace environnant d'éléments magnétiques dirigés suivant des « lignes d'aimantation », ou plus exactement à la création de circuits infiniment petits équivalents à ces éléments magnétiques.

Or ces circuits, formés par la décomposition locale du fluide neutre électrique, sont *créés dans le vide* par une transmission de proche en proche. L'hypothèse de l'orientation de courants préexistants tombe d'elle-même puisqu'avant la fermeture du circuit, le fluide neutre n'est le siège d'aucun courant.

A l'appui de cette modification fondamentale dans sa théorie magnétique, Ampère rappelle son expérience sur les courants par influence faite à Genève en 1822 et les expériences de Becquerel montrant

⁶⁰ *Correspondance*, t. II, p. 683.

⁶¹ Mémoire du 21 novembre 1825, *Coll. Mém.*, t. III, p. 198.

⁶² *Correspondance*, t. III, p. 927.

⁶³ *Théorie des phénomènes électrodynamiques*, p. 165, *Coll. Mém.*, t. III, p. 145.

que « le courant électrique imprime en effet à tous les corps l'espèce d'aimantation dont il est ici question, aimantation qui disparaît dès que le courant est interrompu » ⁶⁴.

Il est intéressant de rappeler les diverses interventions de cette fameuse expérience de Genève :

- lorsqu'elle échoue en 1821, elle est une « preuve démonstrative » en faveur de l'hypothèse de l'orientation de courants préexistants :
- lorsqu'elle réussit en 1822, elle devient un « fait indépendant jusqu'à présent de la théorie générale des phénomènes électrodynamiques » et est discrètement écartée de l'ensemble expérimental nécessaire à cette théorie !.
- lorsqu'en 1825 Ampère remplace l'hypothèse de *l'orientation* par celle de la *création* de courants par influence, elle est réhabilitée et de nouveau invoquée !

En conclusion, soulignons comme il est difficile de parler de « la » théorie du magnétisme d'Ampère.

Les variations et même les revirements complets n'ont pas manqué, en 1821, 1822 et 1825. Toutefois Ampère lui-même est de moins en moins précis dans la description physique de son modèle : au début de ses recherches il espère pouvoir déterminer la véritable structure des courants dans les aimants, c'est-à-dire le « noumène » ; mais en 1826 subsiste surtout une « identité, purement mathématique » entre la cause des phénomènes magnétiques dus aux aimants et ceux dus aux circuits électriques. Cette cause finale est « le mouvement continu des deux fluides électriques ». N'est-ce pas là effectivement l'origine du magnétisme ?

On peut comparer ce détachement progressif d'un modèle censé décrire la réalité au profit d'une idéalisation mathématique de plus en plus grande à celui de Maxwell vis-à-vis de son propre modèle mécanique entre 1861 et 1864.

V. L'ÉTHER ET SON RÔLE DANS LA PROPAGATION DES PHÉNOMÈNES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

En 1820, lors de ses premières recherches, Ampère fait deux références discrètes à l'éther : le 6 novembre 1820 pour justifier la loi d'addition des éléments de courants (voir p. 88) et le 15 janvier 1821 pour souligner que l'hypothèse des courants particuliers dans les aimants est aussi compatible que celle des courants autour de l'axe de l'aimant avec une propagation de l'effet magnétique dans l'éther.

Mais même si la considération de l'éther fut fondamentale pour lui dès cette époque ⁶⁵, il ne la mentionne pas dans son mémoire imprimé. Son caractère anti-newtonien était en effet peu fait pour convaincre l'Académie déjà réticente !

En 1822, la nouvelle théorie étant assise sur des bases expérimentales plus fermes, Ampère reprend dans le *Recueil d'Observations électrodynamiques* ces considérations qui n'avaient sans doute été qu'évoquées lors des lectures de 1820.

Il rappelle d'abord que les forces électrodynamiques entre conducteurs ne peuvent être attribuées à des fluides électriques au repos, pour une raison ancienne : l'absence d'effets électrostatiques au voisinage des conducteurs, et pour une raison nouvelle : la création de force vive dans les rotations continues ⁶⁶.

⁶⁴ « Analyse du mémoire du 21 novembre 1825 », dans *Coll. Mém.*, t. III, p. 214 (voir aussi p. 215-216).

⁶⁵ Dans la Note B du *Précis de la théorie des phénomènes électrodynamiques* (1824), il écrit : « J'ai suffisamment indiqué, dans le Mémoire que je lus à l'Académie le 6 novembre 1820, la manière dont je concevais, que les attractions et les répulsions électro-dynamiques étaient dues aux mouvements communiqués à l'éther par les courants électriques des deux fils entre lesquels on observe ces forces » (*Coll. Mém.*, t. III, p. 106).

⁶⁶ « Exposé sommaire des nouvelles expériences ... », lu le 8 avril 1822, *Recueil*, p. 213 et 205, *Coll. Mém.*, t. II, p. 249

Celles-ci ne peuvent être attribuées qu'au mouvement des fluides opposés dans le conducteur formant une suite de décompositions et de recompositions très rapides.

Mais ce mouvement, affirme-t-il, ne se limite pas aux conducteurs : « on ne peut se dispenser d'admettre que les mouvements des deux électricités dans ces fils *se propagent tout autour dans le fluide neutre* qui est formé de leur réunion, et dont tout l'espace doit être nécessairement rempli (...) ; en sorte que quand les mouvements produits ainsi dans le fluide environnant, par deux petites portions de courants électriques, se favorisent mutuellement, il en résulte entre elles une tendance à se rapprocher (...) ; et que, quand les mêmes mouvements se contrarient, les deux petites portions de courants tendent à s'éloigner l'une de l'autre » ⁶⁷.

La composition des mouvements dans l'éther (addition des vitesses) implique alors la composition des forces dues à deux ou plusieurs éléments de courants. Ce sont donc les propriétés mécaniques de ce fluide neutre qui interviennent d'abord, de même que pour l'éther de Fresnel. Le rapprochement entre les deux n'est pas fortuit et souligné par Ampère lui-même :

« A l'époque où je m'occupais de ces idées, M. Fresnel me communiquait ses belles recherches sur la lumière, dont il déduit les lois qui déterminent toutes les circonstances des phénomènes de l'optique. J'étais frappé de l'accord des considérations sur lesquelles il s'appuyait, et de celles qui s'étaient présentées à mon esprit relativement à la cause des attractions et répulsions électrodynamiques. Il prouvait, par l'ensemble de ces phénomènes, que le fluide répandu dans tout l'espace, qui ne peut être que le résultat de la réunion des deux électricités, était à peu près incompressible, passait à travers tous les corps comme l'air à travers une gaze, et que *les mouvements excités dans ce fluide s'y propageaient par une sorte de frottement des couches déjà en mouvement sur celles qui ne l'étaient pas encore* » ⁶⁷.

Ainsi s'explique l'attraction d'un conducteur sur un autre : chacun fait partager aux couches voisines de fluide neutre le mouvement dont il est le siège.

1822, c'est aussi l'époque où Cauchy élabore le langage de la mécanique des fluides et où l'espoir point de voir la dynamique des milieux continus atteindre la perfection mathématique atteinte par celle du point matériel.

Mais ce langage est encore balbutiant et Ampère reconnaît que faute de moyens de calculs efficaces, les considérations précédentes sont trop vagues pour servir de base à sa théorie. Ce ne sont que des facteurs de conviction intime.

Toutefois ce but ultime consistant à déduire la loi de l'électrodynamique de la mécanique des fluides reste présente chez Ampère, témoins ces lignes jetées sur un manuscrit :

« Travaux à faire : tirer de l'intégrale de M. Binet
l'équation générale du mouvement des fluides dans
le cas de mouvement

en tirer par le calcul

vibratoire dans un ou plusieurs points
rectiligne dans une ou plusieurs lignes
rotatoire dans un axe ou plusieurs

la lumière de Fresnel
mes attractions et répulsions
la vraie théorie des aimants »

⁶⁷ Coll. Mém., t. II, p. 249 et 243, Recueil, p. 214 et Coll. Mém., t. n; p. 250.

Dans le *Précis de la théorie* ..., (1824), p. 53 (et Coll. Mém., t. III, p. 101) il précise encore les qualités mécaniques de fluide : « Pour que ce principe (de l'action et de la réaction) soit applicable dans le cas de l'action mutuelle de deux particules matérielles traversées par le courant électrique lorsqu'on suppose cette action transmise par le fluide éminemment élastique qui remplit l'espace et dont les vibrations constituent la lumière (1), il faut admettre que ce fluide n'a *aucune inertie appréciable*, comme l'air à l'égard du boulet et du canon; mais c'est ce dont on ne peut douter, puisqu'il n'oppose aucune résistance au mouvement des planètes ». , '

(1) Note d'Ampère : « Ce fluide ne peut être que celui qui résulte de la combinaison des deux électricités. Afin d'éviter de répéter toujours la même phrase pour le désigner, je crois qu'on doit employer, comme Euler, le nom *d'éther*, en entendant toujours par ce mot le fluide ainsi défini ».

Et dans un autre brouillon : « Pour la lettre à M. Erman : trois mouvements de l'éther, vibratoire pour la lumière, de translation pour les conducteurs, de rotation pour les aimants » ⁶⁸.

Mais la tâche ne peut encore être accomplie. En 1824 il exprime ses regrets à A. de La Rive :

« Quant à moi, je ne doute guère que les attractions et répulsions des courants électriques ne soient, comme l'attraction (newtonienne), *un résultat des mouvements du fluide qui remplit tout l'espace* (...). Mais comme la dynamique des fluides et les propriétés particulières de celui qui remplit l'espace sont bien loin d'être assez bien connues pour qu'on puisse calculer les effets de ces mouvements, je persiste à croire qu'on doit conclure les formules qui expriment les forces des observations réduites à des lois générales empiriques, comme Newton a déduit la formule de l'action (newtonienne) des lois de Kepler » ⁶⁹.

Cependant précise-t-il dans une Note du *Précis de la théorie des phénomènes électrodynamiques*, « si l'on parvient un jour (à déduire la force entre deux éléments de courants des mouvements que ces courants impriment à l'éther), on ne peut guère douter qu'on en déduise précisément ma formule comme M. Cauchy a tiré la formule de M. Fourier relative à la propagation de la chaleur dans les corps, de la considération des mouvements vibratoires des particules des corps » ⁷⁰.

C'est sans doute à cette époque qu'Ampère tente lui-même d'expliquer la propagation des phénomènes lumineux par des mouvements vibratoires dans l'éther...

Le problème n'est pas évoqué dans ses textes imprimés mais dans le mémoire du 5 janvier 1824 transmis par l'Abbé Moigno, « Sur le mode de transmission des courants électriques et la théorie électro-chimique » (annexe III).

A la fin de ce texte, on peut lire que « la considération des forces électriques peut servir à expliquer jusqu'à un certain point la propagation de la lumière » ⁷¹.

Le mécanisme proposé, la propagation de décompositions et recompositions de molécules de fluide neutre dans une direction perpendiculaire à celle de la propagation, répond bien aux exigences de la théorie de Fresnel.

Il ne permet cependant pas de relier les deux théories, l'optique ondulatoire et l'électromagnétisme d'Ampère.

En effet, tandis que la nouvelle optique centre son attention sur le phénomène de propagation, la théorie électrodynamique telle qu'elle a été élaborée par Ampère ne dispose pas d'outils mathématiques pour l'appréhender.

Prisonnier du cadre conceptuel qu'il s'est lui-même forgé, Ampère ne dispose que de voies parallèles pour tenter d'introduire les modifications de l'espace dans son modèle.

Il est significatif à ce sujet de voir Ampère écrire à Faraday au début de 1825 :

« Je pense que tout ce qui s'est fait en physique depuis le travail du Dr Young sur la lumière et la découverte de M. Ørsted prépare une ère nouvelle à cette science et que *les explications déduites des effets produits par le mouvement des fluides impondérables remplaceront successivement celles qui sont adoptées aujourd'hui* et qui ont pour objet *moins de faire connaître la véritable cause des phénomènes que de donner les moyens les plus sûrs de les calculer*. Je crois que l'on doit chercher dans les mouvements des fluides répandus dans l'espace l'explication des faits généraux et que c'est aux formules déduites de l'expérience à en faire connaître les détails et à donner le moyen de les calculer » ⁷².

68 Arch. carton x, chem. 205 et carton ix, chem. 173.

69 Correspondance, t. II, p. 658. . .

70 Note B du *Précis de la théorie des phénomènes électrodynamiques* (1824) et *Coll. Mém.*, t. III, p. 106.

71 Annexe III. p. 184.

72 Correspondance, t. II, p. 675.

C'est cette intime conviction qui lui fait proposer dans le mémoire de novembre 1825 montrant l'équivalence circuit-feuillet magnétique un mécanisme de propagation des effets électrodynamiques dans l'éther.

Rappelons que cette équivalence étant valable entre le circuit et tout feuillet limité par lui (satisfaisant à la relation entre l'intensité du courant et la puissance des éléments magnétiques) Ampère remplace le circuit par une distribution continue de feuillets, c'est-à-dire d'éléments magnétiques disposés suivant des « lignes d'aimantation » perpendiculaires aux feuillets.

Quant à la création dans l'espace rempli de fluide neutre de ces éléments magnétiques ou plutôt des circuits infiniment petits auxquels ils sont équivalents, elle se produit selon le processus suivant :

« On voit sur le champ que le courant électrique du fil conducteur doit imprimer aux particules de fluide neutre répandues dans l'espace *un mouvement de rotation qui se propage de proche en proche* suivant les surfaces dont je viens de parler (les feuillets magnétiques), et qu'il résulte autant de courants électriques infiniment petits qu'il y a de ces particules, puisqu'elles sont chacune composées de molécules d'électricité positive et de molécules d'électricité négative » ⁷³.

Mais dans le Traité de 1826, Ampère ne peut se permettre de soutenir un projet aussi vague, aussi indépendant de ses autres résultats et aussi contraire aux fondements de la physique newtonienne.

En outre, il reste toujours convaincu que ces phénomènes doivent être soumis, « aux procédés du Calcul intégral, procédés auxquels nous croyons qu'on doit ramener toutes les questions de ce genre quand on veut s'en faire des idées nettes » ⁷⁴.

Aussi reste-t-il d'une grande prudence vis-à-vis du rôle de l'éther, ne mentionnant pas son rôle éventuel de support de propagation d'un mouvement et n'évoquant que sa nature électrique, « le fluide neutre », et ses propriétés mécaniques : être un fluide « éminamment élastique », « presque incompressible », et « d'aucune inertie appréciable ».

VI. LES DERNIÈRES RECHERCHES

Après la parution de sa *Théorie des phénomènes électrodynamiques*, Ampère s'occupe encore de la publication de son mémoire d'octobre 1826 par l'Académie de Bruxelles mais il abandonne calculs et expériences sauf pour ses cours au Collège de France où il élargit de plus en plus ses considérations à la théorie de la chaleur et de la lumière puis à la classification des Sciences ⁷⁵

En août 1828 il lit à l'Académie un mémoire d'optique destiné à compléter la théorie de Fresnel. L'intérêt pour l'électrodynamique s'estompe peu. à. peu.

Il faut cependant signaler qu'en 1826 Ampère reproduit avec l'aide de Colladon l'expérience d'Arago sur le « magnétisme de rotation », à savoir le mouvement qu'un disque métallique horizontal en rotation *imprime* à un aimant mobile au-dessus de son centre, en remplaçant l'aimant par un solénoïde.

Mais il n'intervient pas dans les tentatives d'explications du phénomène qui était en fait un phénomène d'induction. Ce sont les Anglais Babbage et Herrschell qui tentent cette explication à l'aide de la théorie d'Ampère.

Le 4 juin 1827, Ampère est, fait intéressant et non signalé, chargé par l'Académie de faire le rapport sur la *Théorie mathématique du courant électrique* de G.S. Ohm avec Dulong mais l'original du Procès-

⁷³ «Précis d'un mémoire sur l'électro-dynamique», lu le 21 novembre 1825, *Coll. Mém.*, t. III, p. 216.

⁷⁴ «Note relative au mémoire de Savary », 1822, dans *Recueil* p. 360 et *Coll. Mém.*, t. II p. 380 (note 1).

⁷⁵ Ces préoccupations se manifestent dans la « Note de M. Ampère sur la chaleur et sur la lumière considérées comme résultant de mouvements vibratoires », dans *A.C.P.*, t. 58, 1835 p. 432.

verbal de la séance indique que l'ouvrage est en Allemand ce qui explique qu'il n'ait pas dû bénéficier d'un rapport très fourni. .

Cependant son vieillissement précoce, sa santé déficiente, la surcharge de travail que représentent pour lui les cours à l'Ecole Polytechnique et au Collège de France, les soucis familiaux et financiers se conjuguent pour empêcher Ampère de continuer ses recherches.

En outre, son esprit est repris par la poursuite de cette insaisissable Classification des Sciences, sujet qui le passionne depuis plus de vingt ans.

Ainsi en avril 1833 s'excuse-t-il auprès de son ami A. de La Rive :

« Voilà trois ans que je suis presque exclusivement livré à un immense (travail) dont les différentes parties sont tellement liées qu'aucune d'elles n'est susceptible d'être présentée indépendamment des autres » ⁷⁶.

Ce perpétuel remaniement du tableau des connaissances humaines aboutit en 1834 à la publication du premier tome de *l'Essai sur la philosophie des sciences ou Exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*.

Même la découverte de l'induction par Faraday en 1831 ne peut lui faire quitter le métaphysique, « science unique », pour l'électrodynamique.

Il répète les expériences de Faraday, améliore en octobre 1832 la machine à induction de Pixii en la dotant d'un dispositif de commutation pour redresser le courant, et enfin en avril 1833, communique des résultats d'expériences sur la production de courants induits par l'action d'un aimant dont on fait varier la température. Mais cette dernière série de recherches est surtout menée pour vérifier les résultats des expériences faites en 1820 avec Fresnel pour tenter de créer des courants par influence ⁷⁷.

La période électrodynamique aura duré dix ans, de 1820 à 1826 et n'aura vraiment occupé toutes les pensées d'Ampère que quelques mois, de septembre 1820 à janvier 1821.

⁷⁶ *Correspondance*, t. II, p. 760. . . .

⁷⁷ *Correspondance*, t. II, p. 768 (Lettre à Faraday du 13 avril 1833) et Arch., carton IX, chem. 178.

CONCLUSION

Au terme de cette étude, nous voudrions souligner un point : la complexité de la genèse de la théorie d'Ampère et sa non-conformité aux affirmations a posteriori de son auteur, et discuter un deuxième point : l'appartenance de son œuvre à la physique newtonienne.

Même si les protestations d'empirisme d'Ampère « J'ai consulté uniquement l'expérience »¹ sont à replacer dans le cadre polémique qui entoura ses premiers travaux, l'analyse des rapports entre l'expérience et la théorie au cours de ses recherches montre l'importance de l'aspect expérimental ainsi que son évolution.

Dans la première phase de ses recherches, la phase de création, l'expérience qualitative et la manipulation d'objets nouveaux mais simples, contribuent activement à la formulation des concepts théoriques et des lois, comme par exemple la loi d'addition des éléments de courants. Ces expériences sont des « questions », elles révèlent des éléments nouveaux et imprévus.

Dans la deuxième phase, celle de l'établissement de la formule électrodynamique et de ses conséquences, le rôle de l'expérience se modifie peu à peu.

Les rotations continues de Faraday suscitent encore chez Ampère quelques recherches expérimentales menées dans le but de découvrir de nouveaux phénomènes, en particulier la rotation d'un aimant autour de son axe sous l'action d'un conducteur. Ces expériences aboutissent encore parfois à des résultats imprévus comme la découverte du troisième cas d'équilibre.

Mais elles sont de plus en plus des conséquences de la théorie destinées à la vérifier, non aux yeux d'Ampère lui-même, mais aux yeux de ceux qu'il faut convaincre ! Conçus a priori, les dispositifs devant manifester une propriété déterminée des actions entre courants se compliquent. Ils se compliquent si bien que leur réalisation matérielle intervient souvent bien après la publication du mémoire dans lequel ils sont décrits, voire même ne voit jamais le jour. La gravure des appareils suffit alors à l'argumentation d'Ampère et il peut parfaire l'aspect esthétique de ces expériences.

Ces « expériences théoriques » qui se distinguent des « expériences en pensée » par la précision de leur description (il suffit de transmettre la gravure de l'imprimeur au constructeur) ne sont cependant pas sans poser des problèmes techniques². Ainsi nous avons vu que la troisième expérience fondamentale pour l'établissement de la formule était si peu précise qu'Ampère lui-même l'élimina dans les Notes de la première édition de son Traité. La quatrième expérience, encore plus délicate, ne fut jamais réalisée.

L'expérience n'est plus qu'un outil formel de démonstration, dont le résultat est certain d'avance même si des obstacles matériels peuvent s'opposer à sa réalisation.

¹ *Théorie des phénomènes électrodynamiques*, p. 5 et *Coll. Mém.*, t. III, p. 3.

² Ces problèmes, malgré leur importance pour un physicien, sont rarement évoqués par Ampère. On peut citer le mémoire du 10 juin 1822 :

« Depuis que ceci est écrit, j'ai fait avec ces conducteurs les expériences auxquelles je les avais destinées; tes résultats ont été ceux que j'attendais d'après la théorie, mais la résistance du mercure rend ces expériences assez difficiles ... » (*Recueil*, p. 291).

CONCLUSION

Les qualités d'expérimentateur d'Ampère semblent d'ailleurs avoir été assez faibles devant ses qualités de concepteur d'appareils. Tous les témoignages de ses contemporains s'accordent sur ce point. Il était très myope et en outre, d'après Arago, « une blessure grave qu'(il) reçut au bras dans sa première jeunesse, n'avait pas peu contribué à le priver de toute dextérité manuelle » et explique sa grosse écriture faite avec le bras et non le poignet ³.

Psychologiquement et physiquement, il était donc incapable de réaliser avec la minutie nécessaire des séries de mesures précises comme son contemporain J.B. Biot.

Par contre son imagination, sa capacité à inventer de nouvelles structures physiques jointes à une obstination qui finit par rencontrer le hasard favorable lui permettent de créer une nouvelle théorie physique plutôt que d'en parfaire une ancienne. Sa liberté vis-à-vis de l'expérience a pour répondant au niveau théorique sa liberté vis-à-vis des modèles physiques : les hypothèses se succèdent au sujet de la répartition des courants autour des particules et de la structure d'ensemble de ces courants dans les aimants. Malgré son désir d'atteindre les causes finales Ampère sait que le domaine des noumènes est inaccessible et que plusieurs systèmes de relations entre les phénomènes qui leur correspondent sont possibles.

La garantie de validité de sa théorie est sa capacité de prédiction ainsi que sa capacité à unifier diverses branches de la physique jusqu'alors indépendantes.

Si l'expérience n'a donc pas joué le rôle classique qu'Ampère lui assigne, voyons ce qu'il en est de ses déclarations au sujet de l'appartenance de sa théorie à la physique newtonienne. Lorsqu'au début de son *Traité* il affirme avoir mené ses recherches « guidé par les principes de la physique newtonienne », quels sont les principes en cause ?

Sans aucun doute les principes généraux de la mécanique, en particulier celui de l'inertie et celui de l'égalité de l'action et de la réaction. Mais à côté de ces principes, il songe certainement aussi au programme des physiciens du 18^e siècle qui prolongèrent l'œuvre de Newton : réduire les phénomènes physiques à des forces centrales entre particules de matière ou de fluides, forces instantanées, indépendantes du mouvement des particules et fonctions seulement de leur distance.

Les principes généraux de la mécanique étaient certainement pour le professeur d'analyse et de mécanique de l'Ecole Polytechnique qu'était Ampère des fondements inébranlables de la physique. Il fait même du principe de l'action et de la réaction une utilisation plus large que Newton en l'appliquant aux éléments de courants qui, contrairement aux particules de fluides ou de matière, ne peuvent ni se concevoir isolément ni se réduire géométriquement à un point.

D'autre part son œuvre, qui a pour but essentiel de fonder une nouvelle théorie du magnétisme qui soit un chapitre de l'électrodynamique, se présente dans ses grandes lignes comme répondant à un projet newtonien : le « fait simple et primitif » est une force centrale, instantanée et indépendante du mouvement des corps. Les phénomènes électrodynamiques se passent dans un espace absolu :

« Cette condition de l'action égale à la réaction, suivant les mêmes droites, entre (l'élément de courant) et tous les points de l'aimant, est une suite nécessaire de ce que les molécules de fluides impondérables

³ ARAGO *Œuvres complètes*, t. II, 1854, p. 108 et 86. Ampère raconte lui-même que c'est grâce à son « bras estropié » qu'il s'est fait rayer de la garde nationale avant l'occupation de Paris en 1814 (*Correspondance*, t. I, p. 468). J.D. Colladon qui expérimenta avec Ampère au sujet du magnétisme de rotation en 1826 rapporte le témoignage suivant : après une séance de l'Académie des Sciences où une expérience d'Ampère avait échoué, « M. de Laplace vint à moi et me demanda si je croyais que les expériences de M. Ampère fussent réelles. Je lui répondis que je n'en doutais pas, que je les avais vues essayer à Genève et répéter à Paris et M. Laplace me dit alors : « Oh ! Je suis bien aise de ce que vous me dites car M. Ampère est si maladroit, qu'on prétend toujours que quand l'appareil ne bouge pas, il le pousse pour le faire avancer ». » *Souvenirs et mémoires* 1893, p. 121). Pour sa part, Ørsted note dans sa correspondance lors de son voyage à Paris en 1823 (*On the 10th feb. 1823*) I was at Ampère's by appointment to see his experiments (....) He had three considerable galvanic apparatus ready. his instruments for showing the experiments are very complex, but what happened ? Hardly any of his experiments succeeded... He is dreadfully confused and is equally unskillfull as an experimenter as a debater » (H.C. ØRSTED *Naturvidenskabeliges skrifter, Scientific papers*, t. I, 1920, p. CXIV).

ne peuvent agir que comme celles des corps pondérables et doivent, comme celles-ci, lors même qu'elles sont en mouvement, exercer à chaque instant la même action que si elles étaient en repos là où elles se trouvent à cet instant »⁴.

Le caractère non-newtonien de la force d'Ampère entre deux éléments de courants provient de l'intervention dans la formule des trois angles qui déterminent les positions relatives de ces éléments. Mais cette caractéristique mathématique de la force, qui fut violemment reprochée à Ampère par les disciples de Laplace, est expliquée par la nature géométrique des éléments de courants. L'extension mathématique correspond à une extension à une nouvelle sorte d'entités microscopiques :

« Il est naturel de penser, que les forces qui, comme la gravitation universelle, sont inhérentes aux particules matérielles soient de même intensité dans tous les sens autour de ces particules ; mais quand il s'agit de forces que ces particules n'acquièrent que quand il s'y passe un phénomène physique tel que les compositions et décompositions du fluide neutre qui se succèdent rapidement dans les particules des conducteurs voltaïques suivant une direction déterminée (..), on conçoit aisément que ces forces, tout en émanant toujours en ligne droite de ces particules, peuvent varier d'intensité, et même changer de signe suivant les directions »⁵.

Cette modification du schéma newtonien est pour Ampère une généralisation de ce dernier et permet d'en conserver l'esprit.

L'intervention de fonctions angulaires dans sa force élémentaire explique également la violation apparente du principe de la conservation des forces vives dans les expériences de rotations continues. C'est en effet une condition nécessaire d'application de ce principe que les forces ne dépendent que de la distance.

Avec des circuits fermés, où la force totale est fonction seulement de la distance, la conservation des forces vives est d'ailleurs vérifiée et les rotations continues impossibles. Ces expériences ne remettent donc pas en cause pour Ampère les principes newtoniens.

L'impossibilité du mouvement perpétuel est liée à des conditions mathématiques qui, si elles ne sont pas vérifiées, peuvent permettre à ce mouvement d'avoir lieu. C'est le cas des rotations continues faisant intervenir un ou plusieurs circuits non fermés. Il y a alors création de force vive : dans un manuscrit on peut même lire sous la plume d'Ampère « Influence de ces faits sur l'ensemble de la physique par exemple du mouvement perpétuel entre des corps qui restent constamment dans le même état »⁶.

Si dans la plus grande partie de son œuvre imprimée et spécialement dans son *Traité* de 1826, Ampère se montre donc fidèle à l'esprit de la physique newtonienne, nous avons vu que par contre des textes moins diffusés ainsi que ses manuscrits montrent qu'il a bien perçu les limites de ce modèle. Dès sa jeunesse Ampère refuse l'idée de l'action à distance mais c'est sans doute le succès de la théorie ondulatoire de son ami Fresnel qui lui fait rechercher à plusieurs reprises entre 1820 et 1827 une explication des phénomènes électromagnétiques par la transmission de proche en proche d'une modification de l'éther qui remplit l'espace. C'est ainsi qu'il aboutit en 1825 à l'hypothèse selon laquelle tout circuit électrique crée dans l'espace qui l'environne des lignes d'aimantation le long desquelles se crient de proche en proche, par décomposition de l'éther, des circuits électriques équivalents à des éléments magnétiques. Mais pour aller plus loin dans cette voie, opposée aux fondements de sa théorie il manque à Ampère les outils mathématiques appropriés, à savoir la mécanique des milieux continus.

4 Mémoire sur l'action mutuelle d'un conducteur voltaïque et d'un aimant, *Coll. Mém.*, t. III,

5 Arch. Ac. Sc., XI, 206 bis.

6 *Ibid.*

CONCLUSION

Même si, comme Newton lui-même, il ne croit pas à la réalité profonde (le « noumène ») de l'action instantanée à distance et s'il se contraint lui-même à rester dans ce cadre newtonien qui se fissure, c'est sans doute parce que ce modèle était dominant, du moins en France, mais aussi parce que ses outils mathématiques étaient encore les plus puissants.

Au cours du XIX^e siècle s'est peu à peu imposée l'image du « Newton de l'électricité » comme l'a nommé Maxwell lui-même, mais aujourd'hui Ampère peut être considéré à la charnière du passage des théories attractionnaires aux théories des champs.

ANNEXE I

« Notice sur la vie et les travaux d'A.M. Ampère ».
Manuscrit autographe, rédigé à la troisième personne en 1824.
Archives de l'Académie des Sciences, carton XXII, chemise 314.

André-Marie Ampère naquit à Lyon le 20 janvier 1775 de Jean-Jacques Ampère, négociant et de Jeanne Antoinette de Sutières-Sarcey. Son père qui n'avait jamais cessé de cultiver la littérature latine et française, ainsi que plusieurs branches des sciences, l'éleva lui-même dans une campagne voisine de la ville où il était né. Jamais il n'exigea de lui d'étudier quoi que ce soit, mais il sut lui inspirer un grand désir de savoir. Avant de pouvoir lire, le plus grand plaisir du jeune Ampère était d'entendre des morceaux de l'Histoire naturelle de Buffon. Il demandait sans cesse qu'on lui lût l'Histoire des animaux et des oiseaux dont il avait appris depuis longtemps tous les noms en s'amusant à en regarder les figures.

La liberté qu'on lui laissait de n'étudier que quand il lui plaisait de le faire fut cause que, quoiqu'il sut épeler depuis longtemps, il ne lisait point encore et c'est en s'exerçant seul à comprendre l'Histoire des oiseaux qu'il apprit enfin à lire couramment. Bientôt la lecture des livres d'histoire et des pièces de théâtre qu'il trouvait dans la bibliothèque de son père l'attacha autant que celle de Buffon. Il se passionnait pour les Athéniens et les Carthaginois, et prenait en haine les Lacédémoniens et les Romains quand il les voyait subjugués ou détruire les peuples qu'il affectionnait. Il prenait un singulier plaisir à apprendre des scènes entières des tragédies de Racine et de Voltaire et à les réciter en se promenant seul.

Les sentiments que ces lectures développaient en lui s'exaltaient par ce qu'il entendait raconter des événements de la guerre que l'Angleterre et la France se faisaient alors au sujet de l'indépendance des Etats-Unis.

Son père, qui connaissait et parlait même la langue de Virgile aussi bien que l'aurait pu faire le plus habile professeur, lui inspira le désir de l'apprendre en lui récitant souvent des vers de cet admirable poète, dont l'harmonie charmait le jeune Ampère. Il sut bientôt assez de latin pour comprendre les auteurs qui ne présentent pas de grandes difficultés ; mais à treize ans, les éléments de mathématiques de Rivard et de Mazéas étant tombés sous sa main, toute autre étude fut oubliée. Il s'en occupa uniquement, et la lecture de ces deux livres fut suivie de celle de l'algèbre de Clairaut et des traités des sections coniques de La Chapelle et du marquis de L'Hôpital. Ne connaissant personne qui eut la moindre connaissance de mathématiques, il se mit à composer un traité des sections coniques avec les matériaux qu'il trouvait dans ces ouvrages et des démonstrations qu'il imaginait et croyait nouvelles. Mais quand il voulut lire les articles de mathématiques de l'*Encyclopédie*, il fut arrêté par le calcul infinitésimal dont il n'avait aucune idée.

Ayant à cette époque, pendant un séjour de quelques mois que son père fit à Lyon, eu l'occasion de voir M. Daburon, alors professeur de théologie au Collège de la Trinité à Lyon, aujourd'hui inspecteur général des études, qui s'était beaucoup occupé de mathématiques, il lui raconta l'embarras où le mettaient les *d* qu'il trouvait dans ces articles sans qu'on y eut dit ce que cette lettre représentait. M. Daburon fut frappé de ce que le jeune Ampère avait sans autre secours les livres qu'il avait étudiés, il eut la bonté de lui donner quelques leçons de calcul différentiel et de calcul intégral, et lui aplanit ainsi les difficultés qui l'avaient arrêté.

Son père pénétré de reconnaissance, se lia d'une intime amitié avec M. Daburon qui venait parfois passer quelques jours à la campagne où il avait ramené son fils. M. Daburon dirigea les études mathématiques du jeune Ampère et lui inspira une nouvelle émulation qui rendit ses progrès plus rapides. Chaque année, M. Ampère passait deux mois à Lyon ; il conduisit son fils à quelques leçons du cours de physique de M. le professeur Mollet. De retour à la campagne celui-ci lut quelques ouvrages de physique et quelques temps après, la lecture des lettres de Rousseau sur la botanique lui ayant inspiré une grande ardeur pour l'étude de cette science, il partagea son temps entre l'herborisation et les calculs

Cependant, les troubles politiques amenaient en France des événements aussi désastreux qu'inattendus ; la guerre civile éclata et Lyon fut assiégé par l'armée de la Convention. M. Ampère laissa sa famille à la campagne et se fit

un devoir de ne pas abandonner ses concitoyens. Il refusa de 'sortir de la ville assiégée et lorsqu'elle succomba, il fut une des premières victimes du tribunal révolutionnaire.

D'après ses ordres, le jeune Ampère fut retenu dans la campagne où il l'avait laissé; on le berçait de la vaine espérance que son père allait lui être rendu et l'étude des mathématiques l'occupait plus que jamais, parce que l'on avait eu soin de lui procurer, peu avant le siège de Lyon, la *Mécanique analytique* dont la lecture l'avait animé d'une nouvelle ardeur. Il en refaisait tous les calculs, et se livrait encore à ce travail dans l'instant où le sort de son père lui fut révélé. Pendant plus d'un an, livré à une douleur qui l'absorbait uniquement, il ne fut plus question pour lui d'aucune étude ¹. Le goût de la botanique se réveilla le premier en lui lorsqu'il revit dans ces campagnes où il avait tant de fois herborisé, les plantes dont il avait déterminé les noms. Bientôt il retrouva le charme qu'il avait éprouvé autrefois en récitant dans ces promenades solitaires des vers français ou latins. Ce n'est qu'alors que la langue latine lui devint familière par une étude suivie des grands écrivains de l'ancienne Rome. Parvenu à sa vingtième année, le jeune Ampère ne pensait pas à jamais quitter les campagnes qu'il avait presque exclusivement habitées jusqu'alors ².

L'impossibilité de former un établissement qui devint le seul but de sa vie, sans avoir ce qu'on appelle un état, le ramena aux sciences exactes dont il ne s'était plus occupé depuis le siège de Lyon, et qui pouvaient seules lui offrir les moyens d'existence indépendants des revenus du petit domaine qui était seul resté de la fortune de son père. C'est dans la vue de se les procurer qu'il quitta en 1797 le séjour de la campagne et vint enseigner les mathématiques à Lyon, et ce travail le conduisit naturellement à se livrer de nouveau à l'étude de cette science et à celle de la physique et de la chimie. S'étant marié en 1799, il fut nommé deux ans après professeur de physique à l'Ecole Centrale du département de l'Ain. Il se trouva dans la nécessité de faire réparer sous ses yeux les divers instruments dont se composait le cabinet de cette école et d'en faire construire de nouveaux pour réaliser les phénomènes qu'il devait expliquer à ses élèves. Il acquit par ce travail l'aptitude particulière à imaginer de nouveaux procédés pour interroger la nature et à construire de nouveaux instruments, aptitude qui lui a été depuis d'un si grand secours dans ses travaux sur les propriétés dynamiques qu'il a découvertes dans les conducteurs voltaïques.

Il fut nommé en 1802 professeur de mathématiques au lycée de Lyon. Cette place remplissait tous ses vœux et il n'aurait sans doute jamais songé à quitter sa ville natale si le séjour ne lui en était pas devenu insupportable par la perte qu'il fit de Madame Ampère dont les vertus et les plus aimables qualités avaient fait le charme de sa vie. Le temps qu'il passa encore à Lyon fut aussi pénible pour lui que celui qui avait suivi la mort de son père. Il trouva enfin une sorte d'adoucissement à la douleur qui l'avait accablé dans l'étude de la philosophie spéculative pour laquelle il a conservé depuis cette époque un goût très vif, mais toujours contrarié par les occupations habituelles du reste de sa vie. Un mémoire de mathématiques que M. Ampère avait composé pendant qu'il professait la physique et la chimie à l'Ecole Centrale de l'Ain ayant été présenté par M. Delambre à l'Académie des sciences, le rapport très flatteur que MM. Delagrange et Biot en firent à cette compagnie déterminait M. Ampère à venir à Paris où M. Delambre fut pour lui un nouveau père; il devint successivement répétiteur d'analyse à l'Ecole polytechnique, membre et secrétaire du bureau consultatif des Arts et Manufactures, inspecteur général des études, et enfin professeur à l'Ecole polytechnique. Il n'avait jamais eu l'ambition de réunir trois places aussi avantageuses et quoiqu'il lui fût facile d'en concilier les fonctions, il crut devoir à la vive amitié qui l'unissait à M. Thénard de lui céder la place qu'il occupait au bureau consultatif.

En 1814, M. Ampère dut aux divers mémoires de mathématiques qu'il avait publiés depuis qu'il résidait à Paris, le choix que l'Académie des sciences fit de lui pour remplacer M. Bossut. M. Ampère se livra particulièrement à l'étude de la physique, de la chimie et surtout de la philosophie spéculative dans son application aux autres sciences, il aimait à voir dans cette application une source de nouveaux progrès et pour ces sciences et pour la philosophie elle-même.

Il allait peut-être publier ses idées sur ce sujet lorsque M. Ørsted découvrit l'action exercée sur un aimant par le fil conducteur d'une pile de Volta. Cette découverte retentit dans le monde savant et elle inspira à M. Ampère des recherches qui le conduisirent à la découverte de deux faits non moins importants, celui de l'action qu'exercent l'un sur l'autre deux fils conducteurs, et celui de la direction d'un fil conducteur par une force émanée du globe terrestre qui est évidemment celle qui dirige l'aiguille d'une boussole. L'action de cette force sur le fil conducteur était niée en Allemagne et en Angleterre lorsque M. Ampère la constata par des expériences plusieurs fois répétées en présence de plusieurs membres de l'Académie le 30 octobre 1820; dès le 25 du mois précédent, M. Ampère avait répété dans une de ses séances les expériences relatives à l'action mutuelle des fils conducteurs. Cette action analysée dans les nombreux phénomènes qu'elle produit, est devenue une source féconde de nouveaux faits. C'est de ces faits, dont les uns ont été découverts par M. Ampère, les autres par divers physiciens, et des calculs déduits de sa formule, par laquelle M. Ampère en a représenté toutes les circonstances, que se compose aujourd'hui la nouvelle branche de physique à laquelle : il a donné le nom d'électricité dynamique et

¹ Variante : « Il passait des journées entières à contempler tristement les bois, les collines et le ciel. »

² Ajout d'un correcteur : « C'est peut-être à ce genre de vie, si longtemps privé de toute communication avec hommes dont se composent nos sociétés modernes qu'on doit attribuer les distractions auxquelles M. Ampère a paru quelques fois sujet et qui l'ont fait surnommer par ses amis le bon La Fontaine ».

qui a fait en si peu de temps des progrès si rapides et si inattendus. L'étude de ces *faits* et des lois de la force dont ils dépendent paraît devoir étendre son influence sur l'ensemble des sciences physiques. Déjà elle a servi à démontrer que les phénomènes qu'offrent les aimants sont de purs phénomènes électriques, et qu'il en est probablement de même des effets attribués à l'affinité et de toutes les lois des combinaisons chimiques. Un des plus grands physiciens de notre époque, M. Arago, a lui-même rendu ce témoignage aux conséquences que M. Ampère a déduites des faits qu'il a reconnu le premier, que ces conséquences ne lui ont pas été inutiles dans ses belles découvertes de l'aimantation par l'électricité, découvertes qui lui ont fourni des procédés d'aimantation supérieurs à tous ceux connus jusqu'à lui et qui dispensent de la nécessité de se procurer un aimant pour en produire d'autres.

C'est à ses travaux sur l'électricité dynamique que M. Ampère doit son admission à la Société Royale de Londres, à celles d'Edinburgh, de Cambridge, à la Société helvétique des scrutateurs de la nature, et aux académies de Genève, Lisbonne, de Stockholm et de Berlin ; il a publié dans différents journaux scientifiques sur les résultats qu'il a obtenus plus de vingt écrits (...).

En 1809, dès que M. Ampère eut connaissance des belles découvertes de M. Gay-Lussac et Thénard sur les diverses substances qui contiennent le corps simple qu'on regardait alors comme composé, et qu'on nommait *acide muriatique oxygéné*, il en conclut que ce corps était un *élément* auquel on devait donner un nom analogue à ceux des autres corps simples; il indiqua le nom du chlore, qui a été depuis adopté généralement. Il fut le premier qui défendit cette nouvelle théorie comme un résultat nécessaire des expériences dont nous venons de parler lorsqu'on se conformait aux principes dont Lavoisier avait fait la base de la chimie, et ce n'est que longtemps après que l'illustre M. Davy, ayant eu la même idée, la fit adopter au monde savant. M. Ampère avait étendu les mêmes considérations aux corps simples, analogues à l'oxygène et au chlore qui est combiné avec l'hydrogène dans l'acide qu'on nommait alors acide fluorique.

Cette fois-ci du moins, il publia son opinion avant qu'elle eut été admise par d'autres, et la France a conservé la priorité à cet égard. Le nom de Phlore qu'il a donné à cet élément méconnu jusqu'à lui a été adopté ainsi que la théorie qu'il suppose par plusieurs de nos savants les plus distingués.

ANNEXE II

Introduction du mémoire inédit et inachevé d'Ampère sur l'électricité et le magnétisme de 1801 (Manuscrit autographe).

Archives de l'Académie des Sciences, carton X, chemise 203.

Toutes les fois qu'une idée heureuse a conduit à la découverte d'une des lois de la nature, mille phénomènes, auxquels d'abord on n'avait pas songé, ont semblé se réunir pour la confirmer. Quand une pensée de Newton dévoila tous les mystères des mouvements célestes, il ne cherchait point à expliquer la cohésion des molécules des corps solides, l'adhérence de celle des liquides et l'ascension de ces derniers dans les tubes capillaires (et tant d'autres recherches). Quand Lavoisier démontra l'existence de cette substance singulière, inséparable des autres qui change tour à tour en s'unissant à eux les corps combustibles en oxydes ou en acides et le calorique en air vital, il ne s'occupait pas d'une foule de phénomènes dont cette grande découverte nous a appris la cause.

J'ai donc pu me flatter que le hasard m'avait favorisé d'une de ces idées qui ouvrent aux physiciens une carrière nouvelle lorsqu'après avoir réduit tous les phénomènes de l'aimant et de l'électricité à un principe unique, j'ai vu naître de ce principe les explications les plus simples et les plus naturelles d'un grand nombre de faits dont les causes étaient encore ignorées.

On pourra juger en lisant cet ouvrage si je n'ai fait qu'un système ou si j'ai découvert quelques vérités.

La première partie de ce mémoire est destinée à l'examen des phénomènes électriques et magnétiques, la seconde exposera l'influence du fluide électrique sur la théorie des couleurs et des affinités chimiques.

Pour éviter toute discussion, je ne m'appuierai que sur des faits connus et avoués de tous les physiciens, réservant pour un second mémoire les expériences nouvelles que j'ai imaginées pour confirmer la théorie qui est développée dans celui-ci.

Les explications que Franklin, Aepinus et Coulomb ont données des phénomènes de l'électricité et de l'aimant se partagent aujourd'hui l'empire de cette partie de la physique. Ce dernier paraît n'avoir inventé son système que pour éviter la conclusion inadmissible à laquelle avait été conduit Aepinus en calculant les effets qui devaient résulter de celui de Franklin relativement à la répulsion qu'il supposait exister entre les molécules de tous les corps et comme j'avais remarqué depuis longtemps que cette erreur d'Aepinus venait de ce qu'il avait oublié de faire entrer dans son calcul la réaction du fluide électrique répandu dans l'atmosphère entre les deux corps dont il examinait les attractions et les répulsions, je ne doutais pas que cette réaction, suite nécessaire de la force expansive commune à tous les fluides élastiques, ne dût suffire pour rendre raison de tous les phénomènes, si le reste de son système était moins contraire aux lois ordinaires de la nature et aux démonstrations de la mécanique.

Trois raisons surtout doivent engager les physiciens à rejeter également ces deux systèmes, la première est cette complication des répulsions supposées entre les molécules des fluides électriques et magnétiques réunies à des attractions des mêmes fluides pour tous les corps ou pour les molécules d'un autre fluide, les unes et les autres agissant à des distances considérables, et sans aucun contact entre les molécules qui réagissent les unes sur les autres. La seconde est cette supposition même d'une action quelconque entre des corps qui ne se touchent pas.

L'attraction newtonienne nous a accoutumés à admettre dans les corps ces sortes de propriétés qui ne présentent à notre esprit aucune idée nette, mais je ne crois pas que cet exemple puisse autoriser la supposition gratuite d'Aepinus et de Coulomb, car si comme le pense un grand nombre de physiciens, l'attraction des corps célestes est causée par un fluide analogue à l'électrique ou au magnétique, on s'exposerait à tomber dans le cercle vicieux le plus ridicule.

Si au contraire, l'attraction, cause de tous les phénomènes que nous observons, ne reconnaît de cause que dans la volonté suprême, si elle est le moyen dont Dieu s'est servi pour compléter l'existence de la matière en réunissant les molécules, elle doit être unique, universelle, constante, et rien n'est moins convenable que d'établir arbitrairement une attraction plus forte entre les molécules d'un fluide et celles des autres corps, une répulsion mutuelle entre les premières, etc.

Enfin, dans la dernière objection que j'oppose à ces ingénieuses hypothèses, il ne s'agit plus d'in vraisemblance; mais d'impossibilité rigoureusement démontrée.

Coulomb admet comme Aepinus et Franklin que les fluides électriques et magnétiques se trouvent en plus ou moins grande quantité dans les corps où se manifeste l'action de ces fluides sans qu'ils puissent croire que leur masse en soit augmentée ou diminuée. Tous les phénomènes s'accordent au contraire à prouver que celle des fluides dont nous parlons ne saurait être comparée à celle des autres corps, pas même des gaz les plus légers et dès lors que deviennent les effets attribués à l'attraction d'un de ces fluides sur un autre corps ? Celui-ci ne doit être déplacé qu'en raison inverse de sa masse et cet effet ne peut être sensible. Que peut-il résulter dans un corps de l'attraction ou de la répulsion qu'éprouve le fluide qui y est contenu ? Cette action doit encore se partager entre eux dans le rapport des masses.

Si l'air renfermé dans une sphère creuse de métal pouvait être soumis à une force qui n'agit pas sur le métal, n'est-il pas évident qu'il ne s'en communiquerait à celui-ci qu'une très petite portion ? Mais si l'air était comprimé dans la cavité de cette sphère, et qu'on lui permît de s'échapper par une petite ouverture, il agirait comme un ressort entre le métal qui l'enchaîne et la masse d'air environnante d'où il résulterait à l'instant un mouvement rapide dans le premier.

Cet exemple ne donne qu'une idée bien vague de la manière dont je conçois que les fluides électriques et magnétiques agissent uniquement par leur force élastique expansive et jamais en raison de leur masse, mais il peut servir à répandre quelque jour sur ce qui va suivre.

Avant d'entrer en matière, je me prescrirai les limites où il me semble nécessaire de se renfermer pour éviter les objections que je viens d'opposer aux systèmes les plus généralement adoptés.

1° On ne doit se permettre d'attribuer aux fluides électriques et magnétiques que des propriétés observées dans d'autres fluides tels que l'élasticité commune à tous les gaz et la propriété d'adhérer aux autres corps qu'on remarque dans la plupart des liquides.

2° On ne doit supposer aucune action entre les mêmes fluides et les corps qu'ils ne touchent pas ou les portions de fluide homogène qui ne leur sont pas contiguës si ce n'est celle qui est produite par la réaction du fluide répandu dans l'espace intermédiaire d'où il suit qu'on doit s'occuper uniquement de l'action de chaque molécule de matière sur celles qui l'environnent immédiatement et comme il n'y a point de vide réel autour de notre globe, cette action se propageant de proche en proche suffit pour expliquer, ainsi qu'on va le voir, tous les phénomènes qui appartiennent à cette théorie dont on pourra faire, à l'avenir, une branche de la mécanique comme on est parvenu à en faire une de l'hydrostatique après que cette dernière science n'eut été longtemps qu'une théorie expérimentale.

Il ne faut plus pour cela qu'un génie capable d'y appliquer le calcul qui a produit tant de merveilles entre les mains des mathématiciens modernes.

Première partie Théorie mécanique de l'électricité et de l'aimant

Tous les phénomènes se réunissent pour démontrer dans tous les corps l'existence de trois fluides, le calorique, l'électrique et le magnétique.

A partir de cet endroit, on ne dispose plus que de la copie non autographe.

ANNEXE III

« Sur le mode de transmission des courants électriques et la théorie électro-chimique ».
Mémoire d'Ampère inédit publié par l'Abbé F. Moigno dans *Traité de Télégraphie électrique*, 1839,
p. 222-240.

Une bonne fortune nous a mis en possession, depuis plus de vingt-cinq ans, du mémoire dans lequel Ampère avait exposé l'ensemble de ses idées sur le mode de transmission des courants électriques et la théorie électrochimique. Nous croyons que ce mémoire n'a jamais été imprimé ; et il nous a semblé qu'il formerait un appendice curieux à nos recherches sur la télégraphie électrique ; nous le donnons donc ici à nos lecteurs, tel qu'il fut écrit sous la dictée de l'immortel physicien.

Nous sommes heureux de pouvoir reproduire les pages profondes qu'Ampère consacra à l'exposition de ces grandes lois, mieux conçues et mieux énoncées par lui que par tous les savants contemporains.

Sur le mode de transmission des courants électriques et la théorie électro-chimique, par M. André-Marie Ampère.

Le fait de la décomposition des corps composés par l'action de la pile voltaïque a donné lieu de soupçonner que l'électricité joue un grand rôle dans les combinaisons chimiques. Je me propose ici de déduire la théorie électro-chimique des principes que j'ai suivis dans mon cours au collège de France.

Je transporterai aux molécules des corps les forces électriques dont l'effet a été observé sur des corps d'un volume fini : je tâcherai de suivre, autant que possible, les conséquences de cette hypothèse pour les comparer avec l'expérience qui seule peut la détruire ou la confirmer.

Si donc nous admettons que les particules des corps soient naturellement dans un état électrique permanent, il résulte de l'ensemble des faits observés que nous devons regarder comme électro-négatifs, c'est-à-dire comme renfermant par leur nature une quantité plus ou moins grande d'électricité négative, tous les corps qui dans les décompositions chimiques par la pile, se portent habituellement au pôle positif, comme s'ils avaient de l'affinité pour l'électricité positive ; tandis que nous regarderons comme électro-positifs ceux qui se portent de préférence au pôle négatif.

Ainsi le fluor, l'iode, l'oxygène, le chlore, les acides, etc., seront électro-négatifs ; l'hydrogène, les oxides, les alcalis, les métaux, etc., seront électro-positifs.

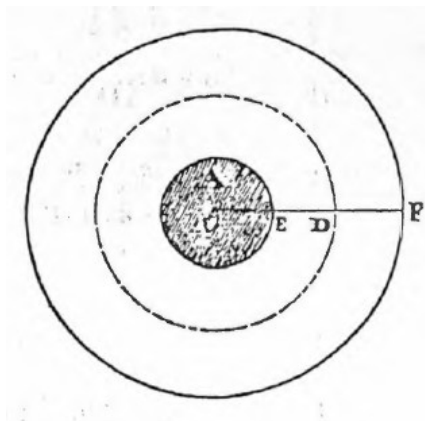
Mais si les particules des corps sont naturellement dans un état électrique, on peut se demander pourquoi ils ne donnent eux-mêmes aucun signe d'électricité. Il est facile de répondre. En effet, les particules des corps se sont trouvées en contact avec des corps plus ou moins conducteurs, puisqu'aucun corps n'est complètement dépourvu de la faculté conductrice avec le temps : elles ont agi par influence pour attirer l'électricité de nom contraire à la leur et pour repousser l'électricité de même nom ; par ce moyen elles se sont formé comme une petite atmosphère électrique qui, à toute distance sensible, dissimule leur électricité propre : elles peuvent être assimilées à de petites bouteilles de Leyde.

Examinons de plus près jusqu'à quel point cette hypothèse est admissible. Considérons un atome d'un corps simple ou d'un corps supposé tel, par exemple, un atome A de zinc.

Il est électro-positif ; il doit donc avoir une atmosphère électro-négative.

Pour fixer les idées, supposons une forme à cet atome, par exemple, la forme d'une sphère. Si l'atome est simple, il faut supposer la vertu électrique répandue uniformément dans toute son étendue. Alors l'action électrique s'exercera comme si tout le fluide était réuni au centre de l'atome A. Cela posé, il résulterait des lois ordinaires de l'électricité que l'atmosphère devrait avoir une épaisseur infiniment petite. Car si nous lui supposons une épaisseur finie EF, une molécule de fluide électrique neutre placée en F ne devra éprouver aucune action. Or l'atmosphère électrique agira comme si elle était tout entière au centre C, et il en sera de même de l'électricité propre de l'atome. Si donc on conçoit une molécule de fluide neutre en D, cette molécule sera soumise à l'action

du fluide propre, comme s'il était concentré en C, et seulement à l'action de la portion de l'atmosphère dont l'épaisseur serait ED ; donc, s'il y a équilibre pour le point F il n'y aura pas équilibre pour le point D. Il faudrait donc que l'épaisseur EF fût pour ainsi dire nulle, et alors tout se passerait comme si l'atome était absolument dans un état neutre : quant à l'électricité de l'atmosphère, elle devra aussi être considérée comme nulle, et on ne pourrait donc tirer, dans ce cas, aucune conséquence de l'hypothèse admise.



Mais il résulterait des mêmes principes que la couche électrique répandue dans une sphère métallique, par exemple, se réduirait à une surface mathématique, ce qui est impossible. Il faut donc supposer que cette couche a au moins une épaisseur comparable à la distance des particules et des atomes, et cela ne peut avoir lieu qu'autant qu'on supposera que les atomes des fluides électriques réagissent les uns sur les autres à des distances très petites, suivant une autre loi que celle de la raison inverse du carré des distances. On peut admettre ce principe sans répugnance, comme on admet que l'action capillaire suit une autre loi que la gravitation universelle.

C'est donc à cette hypothèse que nous nous arrêterons, et nous supposerons que l'atmosphère électrique d'un atome s'étend à une distance comparable aux dimensions des atomes et à leurs distances respectives : et cela quelle que soit la forme des atomes, comme on peut facilement le concevoir.

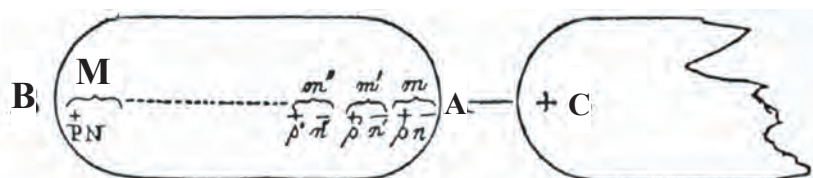
Considérons maintenant une masse métallique quelconque : ce sera comme un système d'atomes liés entre eux invariablement. Chacun de ces atomes, électro-positif par sa nature, aura une atmosphère électro-négative. Mais il est aisé de concevoir que toutes les atmosphères électro-négatives, en vertu de la force moléculaire dont nous venons de parler, réagiront les unes sur les autres, de sorte qu'il y aura une certaine quantité d'électricité négative distribuée d'une manière continue entre les atomes, plus intense seulement près de ces atomes ; outre cela, il y aura une grande quantité de fluide neutre répandu entre les mêmes atomes. Il est évident que ces considérations peuvent s'appliquer à des corps électro-négatifs et aussi à des corps composés dans lesquels, au lieu d'atomes simples, on aurait des particules composées. Ainsi nous considérerons dans les corps quelconques deux sortes d'électricité, l'électricité inhérente aux atomes ou aux particules du corps, et une électricité intermoléculaire formée d'un excès d'électricité contraire mêlée avec une quantité considérable de fluide neutre. Il faudra qu'il y ait équilibre entre les forces électriques, sans quoi il y aurait décomposition dans le fluide neutre intermoléculaire : ainsi l'électricité inhérente aux particules du corps devra être dissimulée par l'excès d'électricité contraire qui se trouve dans l'électricité intermoléculaire.

Nous allons chercher maintenant si ces notions n'ont rien d'incompatible avec le mouvement de l'électricité dans les corps conducteurs.



Soit un conducteur AB en présence d'une source C d'électricité, dont l'intensité puisse être augmentée à volonté. On peut supposer, par exemple, que C soit le conducteur d'une machine électrique ordinaire, et qu'on augmente progressivement la charge de ce conducteur en faisant tourner le plateau ; l'électricité sera positive en C. Dans la théorie ordinaire de l'électricité, on se contente de dire que l'électricité positive de C agit par influence sur le fluide neutre de AB, attire en A le fluide négatif, repousse en B le fluide positif, et l'on paraît croire que cette séparation des deux fluides se fait tout d'un coup, parce qu'en effet le phénomène a lieu dans un temps très court. Cette explication brute, qui suffit dans un certain nombre de cas, est pourtant en contradiction avec les notions généralement admises.

En effet, si la molécule m de fluide neutre est décomposée par l'influence de l'électricité accumulée en C, la molécule négative n est attirée à l'extrémité A, la molécule positive p est repoussée, mais il est évident que cette molécule ne peut être chassée tout d'un coup à l'extrémité B, car elle ne peut traverser ainsi tout le corps conducteur AB qui est rempli de fluide neutre, sans agir par attraction sur les molécules négatives, par répulsion sur les molécules positives. Observons, outre cela, que l'influence de C s'étend sur les molécules m, m', m'' , du fluide neutre. Au premier instant, les molécules n, n', n'' sont attirées, les molécules p, p', p'' repoussées, de

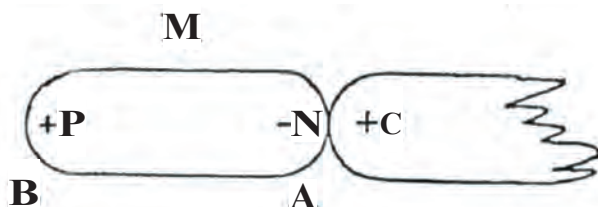


manière à prendre la disposition que représente la figure. Cette disposition est encore favorisée par la réaction mutuelle des molécules p et n', p' et n'' , etc... Dans l'instant suivant, la molécule p se réunira avec la molécule n' et formera une molécule neutre ; la molécule p' se réunira avec la molécule n'' , et ainsi de suite, et alors il restera à l'extrémité B une molécule positive p .

Ce que nous venons de dire pour la série des molécules m, m', m'' , peut se dire également de plusieurs séries de molécules neutres voisines de celles-là ; en sorte qu'après ces décompositions et cette recombinaison intermédiaire dans tout le conducteur AB, il restera en B un excès d'électricité positive qui satisfera aux conditions d'équilibre ordinaires.

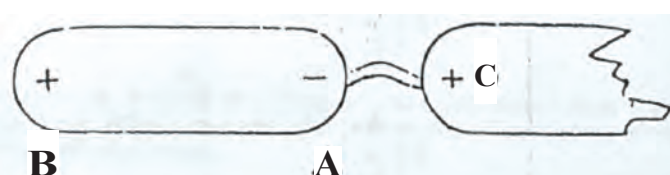
Si l'intensité de l'électricité en C vient à augmenter, les intensités de l'électricité contraire en A et en B augmenteront aussi, mais par une succession de décomposition et de recombinaison telle que nous venons de l'expliquer.

Concevons maintenant que l'on mette le corps conducteur AB en communication immédiate avec une source d'électricité C assez faible pour qu'il n'y ait pas d'étincelle sensible. Dans l'instant qui précède immédiatement le contact, il y a du fluide négatif accumulé en A et du fluide positif accumulé en B, et il y a équilibre entre toutes les forces électriques. A l'instant du contact, une partie du fluide négatif accumulé en A se réunit avec une partie du fluide positif en C pour faire du fluide neutre. Les quantités de fluide en A et en C diminuent, et le fluide positif en B s'étend en partie vers A, parce que la répulsion du fluide qui est en C n'est plus suffisante



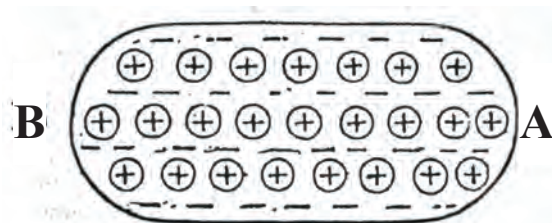
pour le contenir : mais il est évident qu'il y a encore une série de décomposition et de recombinaison de B vers A. Le fluide neutre intermédiaire est décomposé, les molécules négatives se réunissent avec une partie de p et les molécules positives restent en excès vers A. En sorte qu'à l'instant où tout le fluide négatif N de A se sera réuni avec une égale quantité de fluide positif de C, il y aura du fluide positif en excès dans toute l'étendue du corps conducteur AB et du conducteur C. D'ailleurs le fluide se distribuera à la surface suivant les lois ordinaires.

Ces raisonnements s'accordent très bien avec un résultat d'expérience. C'est que les corps les plus conducteurs sont aussi ceux qui s'électrisent le mieux par influence, parce que dans l'un et dans l'autre cas il faut que la décomposition et la recombinaison du fluide neutre puisse se faire avec une grande facilité. Nous regarderons donc dorénavant comme les meilleurs conducteurs les corps qui apportent le moins d'obstacles à la séparation et à la réunion des deux fluides dans leur intérieur.

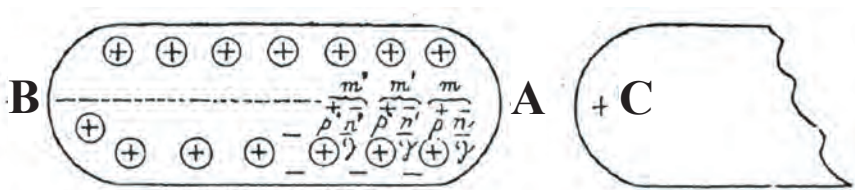


Examinons maintenant comment l'étincelle électrique se produit lorsque le conducteur AB et la source C d'électricité sont en présence. C'est la résistance de l'air qui empêche la réunion du fluide positif en C avec le fluide négatif en A. S'il y avait un vide entre A et C, comme le vide est bon conducteur, ces fluides se réuniraient ou plutôt il y aurait une série de décomposition et de recombinaison dans laquelle tout le fluide négatif de A se trouverait neutralisé, ainsi qu'une égale portion du fluide positif de C. La résistance de l'air s'oppose à cette neutralisation, parce que l'air est mauvais conducteur et empêche les décompositions et recombinaisons qui tendent à avoir lieu entre A et C. Mais lorsque la tendance devient trop forte, elle surmonte la pression extérieure, elle écarte les molécules de l'air, comme le prouve l'expérience¹, et établit entre A et C comme un petit canal vide où les décompositions et les recombinaisons se font avec la plus grande facilité. C'est alors que l'étincelle a lieu, et la compression rapide de l'air qui en résulte élève la température, produit le bruit, et probablement la lumière, comme dans le briquet de compression.

Jusqu'à présent nous avons fait abstraction de l'électricité inhérente aux molécules ; mais cette électricité ne gêne en rien les explications précédentes. En effet, soit un corps conducteur AB dont l'électricité inhérente soit positive, il y aura dans l'électricité intermoléculaire un excès de fluide négatif qui dissimulera l'électricité inhérente comme le représente la figure.



Il y a nécessairement équilibre entre toutes les actions électriques qui s'exercent dans l'intérieur des corps; sans cela il se ferait une nouvelle décomposition dans l'intérieur de ces corps. Si donc le corps est soumis à l'influence d'une source C d'électricité positive, par exemple, au premier instant tout se passera comme si les forces électriques dues à l'électricité inhérente et à l'excès d'électricité intermoléculaire négative n'existaient pas. Une file de molécules neutres m, m', m'', \dots se décomposera donc comme dans le cas précédent sous l'influence électrique extérieure, et l'on aura la disposition déjà indiquée. Dans l'instant suivant, la molécule positive p se réunira à la molécule négative n' pour faire du fluide neutre, la molécule p' à la molécule n'' , etc., ou bien la molécule p se réunira à la molécule négative y en excès dans l'électricité intermoléculaire. La molécule p' pourra de même se réunir à la molécule y' , etc. Mais alors les molécules négatives n, n', n'' remplacent dans l'électricité intermoléculaire les molécules $\gamma, \gamma', \gamma'' \dots$, en sorte qu'il restera une molécule N négative vers l'extrémité A, et une molécule P positive vers l'extrémité B. Il est d'ailleurs évident qu'il en est de même pour d'autres files de molécules entre A et B.



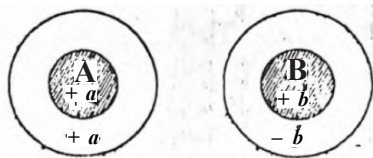
On doit admettre encore que dans le même temps l'électricité positive de C attire vers A l'excès d'électricité intermoléculaire négative, toujours par une suite de décompositions et de recombinaisons intermédiaires : mais alors l'électricité inhérente des molécules du corps, n'étant plus dissimulée au contact, décompose une nouvelle quantité de fluide neutre ; le fluide négatif est employé à la dissimulation de l'électricité inhérente ; le fluide positif, repoussé par cette électricité inhérente, obéit, en outre, à la répulsion de l'électricité positive de C et est chassé vers B, mais toujours par une suite de décompositions et de recombinaisons; en sorte qu'il se trouve une certaine quantité d'électricité négative à l'extrémité A et une certaine quantité d'électricité positive à l'extrémité B, conséquence entièrement conforme à expérience.

¹ Cette expérience consiste à faire éclater l'étincelle dans un espace plein d'air qui contient de l'eau dans sa partie inférieure, et auquel est adapté un petit tube latéral dans lequel l'eau se tient de niveau; au moment de l'explosion l'eau monte dans ce tube latéral.

On voit par là que l'électricité inhérente et l'excès d'électricité intermoléculaire contraire ne s'opposent en rien aux décompositions et recompositions produites par les forces électriques. Des considérations semblables s'appliquent également dans le cas du contact où l'électricité de la source semble passer dans le corps conducteur.

Ainsi l'hypothèse de l'électricité inhérente aux molécules des corps n'a rien de contraire aux notions généralement admises. Voyons maintenant si les conséquences qu'on en peut tirer s'accordent avec l'expérience.

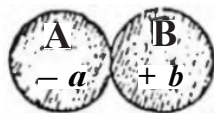
Dans la combinaison de deux particules, il peut arriver quelles soient dans des états électrique différents ou dans des états semblables.



Soit d'abord le premier cas, une seule molécule A électro-négative, et une molécule B électro-positive : la molécule A aura une certaine quantité $-a$ d'électricité négative qui sera dissimulée par une égale quantité $+a$ d'électricité positive qui lui composera une petite atmosphère électro-positive ; la molécule B renfermera une certaine quantité $+b$ d'électricité positive qui sera dissimulée par une atmosphère $-b$ négative. Tant que les molécules A et B seront à une distance suffisante l'une de l'autre, il ne se passera rien ; c'est, en effet, ce que l'expérience confirme ; l'hydrogène et l'oxygène, par exemple, peuvent rester en contact dans le même vase sans qu'il y ait combinaison.

Mais si par un moyen quelconque on force les molécules A et B à s'approcher davantage, alors une petite partie de l'atmosphère $+a$ de A se réunira avec une égale partie de l'atmosphère $-b$ de B pour faire du fluide neutre : les électricités propres a de A et $+b$ de B ne seront plus complètement dissimulées ; elles agiront l'une sur l'autre et détermineront un plus grand rapprochement des molécules. Les atmosphères $+a$ et b se neutraliseront de plus en plus, et les particules A et B continueront de se rapprocher jusqu'à ce que la combinaison soit devenue aussi intime qu'elle peut l'être. Alors on aura une molécule composée que je représente par AB.

Si a est plus grand que b , une partie de l'électricité $-a$ de A sera dissimulée par l'électricité $+b$ de B ; mais la molécule composée se comportera comme une molécule électro-négative qui renfermerait une quantité d'électricité représentée par $-(a-b)$, il lui faudra donc une atmosphère électro-positive $+(a-b)$, qu'elle trouvera là tout naturellement. En effet, si le contact de A et B pouvait être aussi intime que le représente la figure, toute l'atmosphère



phère $-b$ de B, attirée successivement par l'atmosphère $+a$ de A aurait neutralisé une égale quantité de cette atmosphère, de telle sorte qu'il n'en resterait plus qu'une partie, justement ce qu'il faut pour dissimuler l'électricité négative $(a-b)$, qui n'est pas encore dissimulée dans la molécule composée AB. Il est probable que dans la réalité, le contact n'est pas aussi intime que nous l'avons supposé, et qu'alors l'électricité $+b$ de B ne dissimule pas une égale quantité de l'électricité a de A ; mais alors toute l'atmosphère de B ne sera pas neutralisée, et il restera toujours ce qu'il faut pour que les électricités propres de la molécule composée AB soient dissimulées à distance sensible.

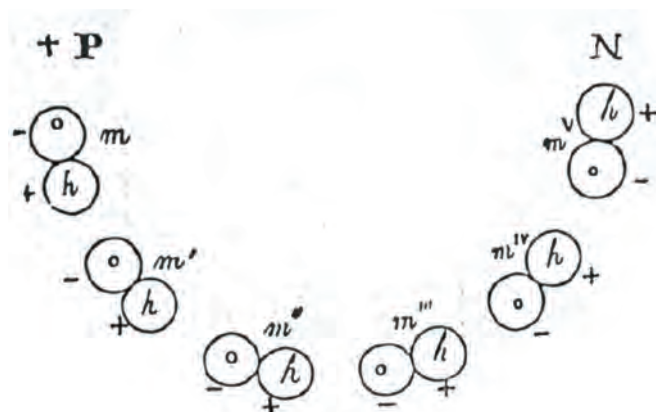
Il est évident que la molécule AB pourrait être considérée comme dans un état neutre, si on avait $a = b$, et qu'elle serait, au contraire, électro-positive avec une atmosphère électro-négative, si on avait a plus petit b .

On doit remarquer que, dans la combinaison de deux molécules de nature électrique contraire, il y a neutralisation plus ou moins complète des atmosphères, et dissimulation seulement des électricités propres.

Il se passera des choses analogues, si l'on considère la combinaison d'un corps électro-négatif avec un corps électro-positif, parce que la combinaison ne se fait jamais qu'entre un petit nombre de molécules.

Par exemple, pour former l'eau, chaque molécule d'oxygène se combine avec deux molécules d'hydrogène, et la particule composée est sensiblement dans un état neutre, en sorte qu'elle n'a pas besoin d'atmosphère : ce qui tient à ce que les électricités propres de deux molécules d'hydrogène peuvent dissimuler à peu près complètement l'électricité propre d'une molécule d'oxygène.

Ces principes peuvent servir à expliquer avec une grande facilité la décomposition des corps composés par l'action de la pile voltaïque.



Soit P le pôle positif, et N le pôle négatif d'une pile, et supposons les deux points réunis par un liquide conducteur, par exemple, de l'eau acidulée ou salée. Il s'établira d'abord une série de décompositions et de recompositions comme nous venons de le dire, mais en même temps, le liquide n'étant pas conducteur parfait opposera au mouvement des fluides une certaine résistance : alors le fluide positif du pôle P attirera l'oxygène *o* de la molécule *m* d'eau la plus voisine, parce que l'oxygène est par sa nature électro-négatif; l'hydrogène l'électro-positif sera repoussé, et la molécule composée *m* prendra la disposition représentée dans la figure. L'hydrogène *h* de la molécule *m* étant électro-positif attirera l'oxygène *o*¹ de la molécule *m'* suivante, repoussera l'hydrogène *h*¹ de cette molécule, et fera tourner la molécule *m'* comme le représente la figure ; et ainsi de proche en proche jusqu'au pôle N de la pile qui attire la molécule *h*^v d'hydrogène d'une molécule *m*^v d'eau, et repousse la molécule *o*^v d'oxygène, de telle sorte que l'action de l'un des pôles s'accorde avec l'action de l'autre pour donner à une série de molécules réunies entre les deux pôles la disposition que nous supposons, et qui est favorisée encore d'ailleurs par les décompositions et recompositions qui se font toujours dans l'électricité intermoléculaire. Bientôt l'action de la pile et de l'électricité qui passe dans l'eau l'emporte sur l'affinité des molécules *m* et *m*^v ; l'oxygène *o* de *m* se sépare de l'hydrogène *h*, qui se réunit avec l'oxygène *o*¹ de *m'* pendant que *h*¹ se réunit avec *o*², *h*² avec *o*³, etc., jusqu'à la molécule *m*^v, où *h*^v attirée par le pôle N de la pile se trouve mis en liberté. Il est important de remarquer que le pôle positif P de la pile, en attirant la molécule *o* électro-négative, lui fournit justement la quantité d'électricité positive nécessaire pour former son atmosphère, tandis que le pôle négatif N fournit une atmosphère électro-négative à la molécule *h*^v d'hydrogène. Il suit de là que si l'on recueille séparément l'oxygène et l'hydrogène, ils ne donneront aucun signe de leurs électricités propres ¹. Mais il n'en serait pas toujours de même dans tout autre mode de décomposition, et alors chacun des corps pourrait donner des signes d'électricité : c'est justement ce qui a lieu dans les expériences de M. Pouillet.

Dans ses expériences, M. Pouillet défait les combinaisons par l'action de la chaleur.

Il met dans une capsule de platine, dont la température a été très élevée, du phosphate d'ammoniaque, combinaison d'un acide, l'acide phosphatique, et d'un alcali, l'ammoniaque. Par l'action de la chaleur, la combinaison se défait, l'ammoniaque, qui est très volatile, se dégage, et l'acide reste : si le creuset est disposé sur le plateau d'un électromètre condensateur, et si l'on reçoit l'ammoniaque dégagé sur le plateau d'un autre électromètre condensateur. Le premier indique que le creuset est dans un état négatif, le second indique que l'ammoniaque est dans un état positif.

En effet, l'acide, électro-négatif de sa nature, ne recevant pas par le mode même de décomposition de quoi dissimuler son électricité propre, agit par influence sur le fluide naturel du creuset, s'empare d'une partie du fluide positif pour dissimuler son électricité propre, et repousse le fluide négatif correspondant, de sorte que le creuset est extérieurement dans un état négatif. De même l'ammoniaque, étant par sa nature dans un état électro-positif, se comporte par rapport au plateau comme un corps chargé d'électricité positive.

On a des effets analogues avec l'eau et un alcali, ou l'eau et un acide.

Soit d'abord une dissolution de baryte : si on la soumet à l'action de la chaleur, l'eau s'en va et la baryte reste.

Avec des électromètres condensateurs convenablement disposés on trouve que l'eau donne des signes d'électricité négative et la baryte des signes d'électricité positive. Pour expliquer cette expérience, il faut se rappeler que la baryte est, en qualité d'alcali, par sa nature, électro-positive ; ses particules ont donc des atmosphères électro-négatives, ces atmosphères s'étendent un peu dans l'eau, et c'est même là une des causes qui favorisent la dissolution. A l'instant où l'eau passe à l'état de vapeur, elle se sépare de la baryte, l'air s'interpose comme une lame isolante et empêche la baryte de reprendre toute son atmosphère qui reste en excès dans l'eau. La vapeur d'eau doit donc

¹ On peut appliquer une explication de même genre à toutes les décompositions chimiques par l'action de la pile, et les corps séparés ne donneront jamais aucun signe de leur électricité propre.

se trouver dans un état électro-négatif, et la baryte, privée ainsi d'une partie de l'électricité intermoléculaire qui dissimulait son électricité propre, doit donner des signes de cette électricité propre qui est positive.

Si l'on soumet à l'action de la chaleur une dissolution d'ammoniaque, c'est l'ammoniaque qui s'en va et l'eau qui reste. Le condensateur en contact avec l'ammoniaque qui se dégage donne des signes d'électricité positive, l'autre donne des signes d'électricité négative, ce qui doit être. En effet, l'ammoniaque, en qualité d'alcali, est électropositive, et les atmosphères électro-négatives de ses molécules s'étendent dans l'eau. A l'instant de la séparation, l'air s'interpose pour couper l'atmosphère en deux, de manière qu'une partie reste dans l'eau qui doit donner par conséquent des signes d'électricité négative, et l'électricité propre de l'ammoniaque, n'étant plus complètement dissimulée, doit se manifester à l'électromètre. Des raisonnements semblables s'appliquent très bien lorsqu'on soumet à l'action de la chaleur une dissolution d'un acide ; par exemple, une dissolution d'acide sulfurique, ou une dissolution d'acide sulfureux. Dans le premier cas, c'est l'eau qui s'en va, et l'acide reste : dans le deuxième cas, l'acide manifeste l'électricité négative, parce que son électricité propre n'est plus complètement dissimulée ; l'eau manifeste l'électricité positive parce qu'elle a conservé une partie des atmosphères des particules d'acide.

Enfin les mêmes considérations peuvent s'appliquer à une dernière expérience assez curieuse et même plu sensible.

On dispose sur un électromètre condensateur un morceau de charbon ; on l'allume tantôt par sa partie supérieure, tantôt par sa partie inférieure, et l'on dispose un autre électromètre de manière que l'acide carbonique qui se forme vienne toucher le plateau collecteur. Si le charbon est allumé dans la partie supérieure, on reconnaît que l'acide carbonique est dans un état positif, tandis que le charbon est dans un état négatif. Si on l'allume dans la partie inférieure, on n'a aucun signe d'électricité.

L'acide carbonique est formé par la combinaison du charbon avec l'oxygène; or, dans la combinaison de deux corps de nature électrique contraire, en général, une partie des atmosphères des molécules se neutralise, et il reste justement ce qu'il faut pour dissimuler l'électricité propre de la molécule composée : mais cela suppose que les molécules se combinent dans un milieu conducteur, de manière que les parties postérieures des atmosphères puissent tourner, pour ainsi dire, autour des molécules pour aller se neutraliser plus ou moins entre elles.

Or, dans l'expérience précédente, la combinaison du charbon avec l'oxygène se fait dans l'air, qui est mauvais conducteur. Il en résulte que la partie postérieure de l'atmosphère de chaque molécule d'oxygène reste en excès dans l'acide carbonique, et alors il reste aussi sur le charbon la partie postérieure des atmosphères des molécules de charbon qui se sont combinées, de manière que la neutralisation des atmosphères n'a pas été telle qu'elle aurait dû être pour que la neutralisation des molécules fût complète ; l'acide carbonique doit donc donner des signes d'électricité positive à cause des portions des atmosphères d'oxygène qui auraient dû être neutralisées, et qui y sont restées : le charbon doit donner des signes d'électricité négative, parce qu'il a conservé une partie des atmosphères des molécules de charbon qui se sont combinées.

Considérons présentement la combinaison de deux corps doués d'une même électricité propre.

Soit A une molécule du premier, B une molécule du deuxième, soit $+a$ l'électricité propre du premier, $+b$ celle du deuxième, leurs atmosphères seront $-a$, $-b$. Si la combinaison est déterminée par une cause quelconque, la molécule composée AB aura une électricité propre $-(a+b)$, il lui faudra une atmosphère $-(a+b)$: elle la trouvera dans la somme des atmosphères $-a$ et $-b$ des molécules composantes A et B. Mais l'atmosphère $a+b$ ne sera pas répartie également autour de la molécule composée AB à cause de la répulsion mutuelle des molécules du fluide qui la compose, elle se portera du côté de la molécule composante la moins électrique, de manière qu'elle sera plus intense du côté de cette molécule que ne l'était l'atmosphère même de cette molécule avant la combinaison. C'est une raison pour que l'électricité tende à favoriser la combinaison des molécules douées de la même électricité, parce que la répulsion mutuelle des molécules de l'atmosphère la plus intense se trouve mieux satisfaite par l'extension de cette atmosphère.

Si l'une des molécules composantes est à l'état neutre, l'autre fournira ce qu'il faut pour l'atmosphère de la molécule composée ; mais l'atmosphère s'étendra un peu autour de la molécule neutre, ce qui pourra favoriser la combinaison, comme dans le cas précédent.

Si dans l'un ou l'autre de ces deux cas, on pouvait séparer tout à coup par une lame isolante les molécules composantes d'une molécule composée : dans le premier cas, celle qui a l'électricité la plus intense donnerait des signes de son électricité propre, parce qu'elle n'aurait pas eu le temps de reprendre toute son atmosphère, et l'autre manifesterait une électricité contraire due à un excès d'atmosphère; dans le deuxième, la molécule électrique manifesterait son électricité propre, parce qu'elle n'aurait pu reprendre toute son atmosphère ; la molécule neutre donnerait des signes d'une électricité contraire, à cause de l'atmosphère étrangère qu'elle aurait conservée.

Ce qu'on ne peut qu'indiquer ici quand il s'agit de molécules, on peut le vérifier au contact des corps conducteurs en les isolant avec des manches de verre; à l'instant où on les sépare après les avoir mis en contact, l'air qui s'interpose fait l'office de lame isolante.

Soit mis en contact un disque de zinc et un disque de cuivre ainsi isolé : ils sont tous deux électro-positifs, mais le zinc plus que le cuivre. Comme les deux métaux sont conducteurs, les atmosphères des molécules du zinc voi

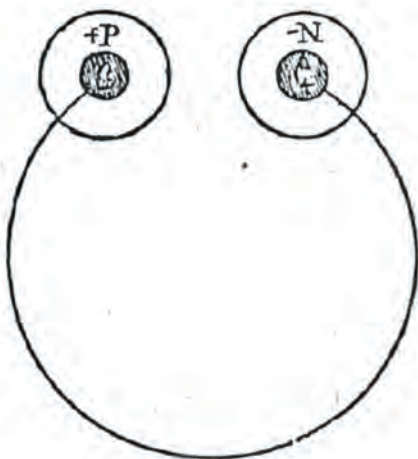
sines du contact pénétreront un peu dans le cuivre, cause de la plus grande répulsion qu'elles éprouvent du côté du zinc, le cuivre deviendra donc un peu électro-négatif par excès d'atmosphère, le zinc un peu électro-positif par son électricité propre ; et si on les sépare tout à coup, ils donneront des signes d'électricités contraires. On peut le reconnaître avec dix à douze contacts, en déchargeant successivement l'un des plateaux sur un électromètre condensateur, et l'autre sur un autre électromètre condensateur. Pour le zinc, il faut interposer une bande de papier mouillé entre le zinc et le plateau de cuivre du condensateur pour empêcher l'action mutuelle du cuivre et du zinc : cette précaution serait inutile si le plateau collecteur était en zinc.

L'exemple de l'autre cas s'est déjà présenté dans l'évaporation d'une dissolution acide ou alcaline.

Ces raisonnements rendent aussi compte, comme on le voit, de la force électro-motrice qui agit dans un couple de la pile voltaïque.

Les mêmes considérations peuvent aussi servir à expliquer quelques expériences curieuses de M. Becquerel, sur le sens des courants qui s'établissent dans le cas de la combinaison ou du simple contact de deux substances.

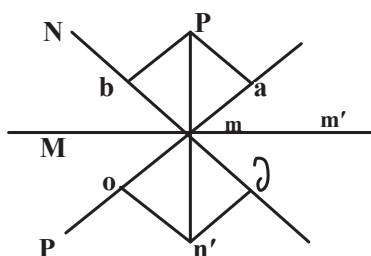
Lorsque l'on fait combiner un corps électro-négatif avec un corps électro-positif, par exemple un acide avec un alcali, et que d'ailleurs on les réunit par un fil métal ligue conducteur, on reconnaît par le galvanomètre qu'il s'établit un courant qui va de l'acide à l'alcali. S'il y a seulement contact, sans combinaison, entre un corps électro-négatif et un corps électro-positif, le courant va du corps électro-positif au corps électro-négatif.



Soit n une molécule d'un corps électro-négatif, et p une molécule d'un corps électro-positif : la molécule n aura une atmosphère positive P , et la molécule p une atmosphère négative $-N$. A l'instant des combinaisons les parties des atmosphères les plus voisines du contact formeront du fluide neutre par leur combinaison, les fluides propres des molécules se dissimuleront mutuellement, au moins en partie, et n'exerceront plus d'action, ou presque plus d'action sur les atmosphères ; ces dernières, à l'exception des parties antérieures qui se sont combinées, reflueront pour ainsi dire dans le conducteur métallique ; et par voie de décomposition et de recomposition elles produiront un courant positif du corps électro-négatif au corps électro-positif, parce que le métal est bien meilleur conducteur que le milieu dans lequel se fait la combinaison.

Supposons maintenant qu'il y ait simplement contact sans combinaison. Les fluides propres se dissimuleront en partie près du contact, les atmosphères formées d'électricités contraires pourront donc se combiner près du contact ; mais à chaque instant les molécules, par leurs électricités propres, attireront les fluides contraires du conducteur interposé pour se former de nouvelles atmosphères et rétablir l'équilibre ; il s'établira donc dans le conducteur un courant positif du corps électro-positif au corps électro-négatif, c'est-à-dire le contraire de ce qui a lieu lors de la combinaison.

La considération des forces électriques peut aussi servir à expliquer jusqu'à un certain point la propagation de la lumière. En effet, concevons que deux molécules, l'une P de fluide positif, l'autre N de fluide négatif, se trouvent séparées par une cause quelconque, pendant qu'elles seront dans un état de séparation elles agiront sur une molécule neutre m composée d'une molécule positive p et d'une 'molécule négative n ; la molécule P exercera sur la molécule p de m une répulsion que je représenterai par ma , et sur la molécule n une attraction que je représenterai par me : de même la molécule N exercera sur p une attraction mb et sur n une répulsion md . Si on fait la composition des forces on trouvera que la molécule p sera sollicitée par une force mp' égale à la diagonale du losange $bmap$ construit sur les forces mb , ma : de même la molécule n sera sollicitée par une force mf égale et opposée à la première : ainsi les molécules p et n se sépareront ; elles reviendront ensuite l'une vers l'autre dès que l'action des molécules N et P aura cessé ; et en général elles dépasseront leurs positions d'équilibre et



exécuteront une suite d'oscillations. Pendant ces oscillations elles agiront à leur tour sur une molécule neutre m' , et ainsi de suite, en sorte qu'il s'établira une série de vibrations transversales qui se propageront m, m' dans la direction M, perpendiculaire au sens des vibrations. Ce mode de vibrations est conforme à celui qui, suivant la théorie de Fresnel, produit la lumière. Si donc on admet que le fluide qui transmet la lumière soit justement le fluide électrique neutre, on pourrait rendre compte des vibrations de ce fluide par des décompositions et des recompositions électriques, qui en effet seraient transversales par rapport à la direction de la propagation.

On sera confirmé dans cette idée, si l'on observe que les conducteurs voltaïques s'échauffent et rougissent par le conflit électrique, résultat dont on rendrait alors raison en supposant que les décompositions et recompositions qui ont lieu dans ces fils déterminent des décompositions et recompositions analogues dans le fluide neutre environnant.

On pourrait aussi concevoir le développement de la lumière dans les combinaisons chimiques énergiques.

Soit pour exemple la combustion de l'hydrogène. D'après ce que nous avons dit plus haut, pendant que l'hydrogène s'unit à l'oxygène pour faire de l'eau, il faut concevoir que les atmosphères des molécules d'hydrogène et d'oxygène se réunissent pour faire du fluide neutre ; mais pendant l'instant où elles sont libres, elles agissent sur le fluide neutre environnant, pour y déterminer des décompositions et des recompositions telles que nous venons de le dire, et auxquelles on peut attribuer la lumière que produit la combinaison.

Si l'on admet qu'il faille un certain degré d'intensité dans les décompositions et les recompositions des fluides électriques pour produire la sensation de la lumière, tant que la combinaison ne serait pas assez intense, il n'y aurait que de la chaleur, ce qui s'accorde très bien avec les idées actuelles sur l'identité du principe de la chaleur et de la lumière.

L'abbé Moigno déclare posséder le manuscrit (non autographe) de ce texte « depuis plus de vingt-cinq ans » ce qui implique avant 1824 puisque l'ouvrage date de 1849.

Or, dans le premier paragraphe Ampère écrit qu'il va suivre les principes qu'il a adoptés dans son cours au Collège de France, cours qui ont commencé en novembre 1824.

Cependant, ce texte correspond à la description faite par Ampère du Mémoire lu le 5 janvier 1824 qui n'a pas été publié (voir chap. V § III). On peut donc penser que le texte a été rédigé à partir de celui, sans doute plus succinct, du mémoire du 5 janvier, en vue du cours du Collège de France.

Une copie, non autographe, de ce texte se trouve aux Archives de l'Académie des Sciences avec pour titre « Théorie électro-chimique ». Ce titre se trouve écrit de la main d'Ampère au dos de la couverture de cette copie, ce qui prouve au moins que le texte a été vu par Ampère de son vivant ! (Arch. Ac. Sc., carton XIV, chemise 250)

Cette copie voisine d'ailleurs avec une feuille rédigée par Ampère résumant les résultats du mémoire lu le 22 décembre 1823 et de celui du 5 janvier 1824.

Dans la même chemise, on trouve d'autres manuscrits postérieurs, non autographes, sur la théorie de la propagation du courant électrique dans les corps suivant qu'ils sont électropositifs ou électronégatifs (texte très voisin dans le carton X, chemise 189).

La possession par l'abbé Moigno de ce texte d'Ampère est plausible dans la mesure où il fut un auditeur assidu du cours d'Ampère au Collège de France. Ainsi J.D. Colladon qui vient étudier à Paris en cette année 1825 qui commence, et qui suit le cours d'Ampère écrit dans ses Souvenirs et Mémoires: « Les vues nouvelles de

M. Ampère sur plusieurs points de la physique, la facilité que nous avons de reproduire ses expériences après son cours nous attiraient. Ce cours n'avait pas beaucoup d'auditeurs mais c'étaient en général des hommes de valeur, parmi lesquels on distinguait M. Moigno »¹.

En outre, l'abbé Moigno collabora avec Ampère pour sa classification des sciences : dans son ouvrage « Les splendeurs de la foi », il présente une « classification des connaissances humaines » dont il écrit : « Je l'ai ébauchée avec M. Ampère en 1829, je l'ai achevée au Puy en 1836. Ampère qui l'avait terminée de son côté, dans une toute autre direction d'esprit, lui a donné le nom de « classification naturelle ». Mais cette dénomination appartient bien mieux à ma classification qu'à la sienne »².

On peut penser que c'est au début de leurs relations qu'Ampère donna à son auditeur du Collège de France le texte que celui-ci publia une vingtaine d'années plus tard.

¹ J.D. COLLADON, *Souvenirs et Mémoires*, Genève, 1893, p. 104. Le cahier de présence signé, en principe, par les auditeurs des cours du Collège de France, comporte peu de signatures, mais pas celle de F. Moigno (Archives du Collège de France dossier Ampère).

² F. MOIGNO, *Les splendeurs de la foi*, t. III, p.1430. Cette collaboration 'est également signalée par A. LARTHES-MÉNAGER, « A.M. Ampère », dans *les Contemporains*, s.d., p. 11.

BIBLIOGRAPHIE

I. Les œuvres d'Ampère sur l'électrodynamique.

II. Etudes sur Ampère et ses travaux scientifiques.

III Etudes sur l'électromagnétisme.

IV. Etudes sur les autres physiciens, leur influence théorique et institutionnelle.

1. Les Œuvres d'Ampère sur l'électro-dynamique

La première tentative de synthèse de l'oeuvre électrodynamique d'Ampère remonte à 1883 lorsque la Société Française de Physique décida de publier une *Collection de Mémoires relatifs à la physique*. J. Joubert rassembla les principaux mémoires d'Ampère, dont un certain nombre d'inédits, dans les tomes II et III de cette Collection.

Il fut sans doute à l'origine du classement des manuscrits des Archives de l'Académie des Sciences dans ses grandes lignes actuelles.

Une recherche plus large dans son objet, puisque non limitée à l'électrodynamique, fut faite par Louis de Launay lorsqu'il édita en 1936 la *Correspondance du Grand Ampère* : à la fin du tome II (p. 803-816) il fournit une bibliographie générale des œuvres d'Ampère et en outre une analyse des *Procès-Verbaux des séances de l'Académie des Sciences* (t. 2 à 10) donnant les dates des communications d'Ampère à l'Académie. Son dépouillement des périodiques de l'époque est loin d'être complet.

La liste des notices, extraits de lettre publiés, mémoires ... ci-dessous est classée suivant l'ordre des lectures à l'Académie et suivant les dates de publication des ouvrages imprimés (la date réelle de publication n'étant pas toujours celle figurant sur l'ouvrage), mais nous avons regroupé toutes les éditions d'un même mémoire sous une référence unique.

Les ouvrages d'Ampère sur les mathématiques, la chimie, l'anatomie, la géologie, la philosophie, quoique indispensables pour comprendre cette pensée multiforme n'ont pas été signalés ici, une liste (incomplète) se trouve dans la bibliographie de L. de Launay déjà citée.

Nous n'avons pas répertorié les manuscrits des Archives de l'Académie des Sciences utilisés car nombre d'entre eux sont des feuilles volantes non classées, si ce n'est sous la rubrique « brouillons sur l'électrodynamique », et parce qu'il existe aux Archives de l'Académie des Sciences un catalogue des manuscrits d'Ampère. Certes les intitulés des chemises ne correspondent pas toujours à leur contenu, nombreux sont les documents mal classés, mais ce catalogue permet cependant de retrouver, après quelque recherche, un manuscrit cité.

Nous signalons en outre deux manuscrits, un de la Bibliothèque de la Ville de Lyon et un de la Société Française de Physique (réf. 39 et 43).

1. Analyse des mémoires lus par M. Ampère à l'Académie des Sciences, dans les séances des 18 et 25 septembre, des 9 et 30 octobre 1820.

1 *A.G.S.P.*, t. VI, 1820, p. 238-257.

2. Tirage à part, s. d., 20 p.

(Institut : Rec M 647^G n° 5)

2. De l'action exercée sur un courant électrique par un autre courant, le globe terrestre ou un aimant -

1 *A.C.P.*, t. 15, 1820, p. 59-76 et 170-208.

2. *Recueil*, p. 3-68.

3. *Coll. Mem.*, t. II, p. 7-54 (version du Recueil).

4. Tirage à part, 1821, *Mémoire sur l'action mutuelle de deux courants électriques, sur celle qui existe entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et celle de deux aimants l'un sur l'autre*. (BN: R 26519)

3. Conclusions d'un mémoire sur l'action mutuelle de deux courants électriques, sur celle qui existe entre un courant électrique et un aimant, et celle de deux aimants l'un sur l'autre, lu le 25 septembre 1820.

J. Phys., t. 91, 1820, p. 76-78 (extrait des *A.C.P.*, t. 15, 1820, p. 209-212)

4. Nouvelles expériences électro-dynamiques - (non signé)
J. Phys., t. 91, 1820, p. 151.
5. Notes de M. Ampère sur les lectures qu'il a faites à l'Académie des Sciences -
 1. *J. Phys.*, t. 91, 1820, p. 166-169.
 2. Tirage à part à la suite de l'article de Hachette « Sur les expériences électro-magnétiques de MM. Ørsted et Ampère » (*Ibid.*, p. 161-166), reçu à l'Académie des Sciences le 27 novembre 1820.
6. Mémoire sur l'expression mathématique des attractions et des répulsions électriques -
Coll. Mem., t. II, p. 128-135, d'après le manuscrit des Arch. Ac. Sc. (carton VIII, chem. 162)
7. Note sur un mémoire lu à l'Académie des Sciences le 4 décembre 1820 -.
 1. *J. Phys.*, t. 91, 1820, p. 226-230.
 2. Tirage à part, 1820, 4 p. in 4^e.
8. Note sur deux mémoires lus le 26 décembre 1820 et le deuxième les 8 et 15 janvier 1821-
J. Phys., t. 92, 1821, p. 160-165.
9. Note sur les expériences de M. Ampère, relatives à l'action mutuelle de deux fils conjonctifs, et à celle qui a lieu entre un fil conjonctif et un aimant ou le globe de la terre -
Bull. Sc. Soc. Phil., 1820, p. 138-140.
10. Note sur les expériences électro-magnétiques de MM. Ørsted, Ampère, Arago et Biot-
 1. *Annales des Mines*, t. V, 1820, p. 535-558.
 2. *Recueil*, p. 69-92 (avec quelques modifications).
 3. *Coll. Mem.*, t. II, p. 136-140 (extrait).
 4. *A.G.S.P.*, t. 7, 1820, p. 252-258 (extrait).
 A propos de cet article, voir p. 96.
11. Analyse des travaux de l'Académie Royale des Sciences, pendant l'année 1820, partie mathématique; Mémoires contenant des expériences relatives à l'action mutuelle de deux courants électriques, et à celle qui existe entre un courant électrique et le globe de la terre ou un aimant, par M. Ampère.
 1. *M.A.R.S.*, 1818-1820, t. IV, p. CXXXVJI-CXLVIII.
 2. *Bibl. Univ.*, t. 16, 1821, p. 309-319.
12. Notice sur les expériences électro-magnétiques de MM. Ampère et Arago, lue à la séance publique de l'Académie Royale des Sciences, le 2 avril 1821-
 1. *Bibl. Univ.*, t. 17, 1821, p. 16-20.
 2. *Recueil*, p. 109-112.
 3. *A.G.S.P.*, t. 8, 1821, p. 101-104.
13. Lettre de M. Ampère à M. Arago (sur l'état magnétique des corps qui transmettent un courant d'électricité) -
 1. *A.C.P.*, t. 16, 1821, p. 119-129.
 2. *Recueil*, p. 99-108.
14. Lettre de M. Ampère à M. Erman (20 avril 1821) -
 1. *Bibl. Uni.*, t. II, 1821, p. 183-191.
 2. *J. Phys.*, t. 92, 1821, p. 304-309.
 3. *Recueil*, p. 113-119.
15. Extrait d'une lettre de M. Ampère à M. le Professeur de La Rive (15 mai 1821).
 1. *Bibl. Uni.*, t. 17, 1821, p. 192-194.
 2. *Recueil*, p. 121-124.
16. Note sur un appareil à l'aide duquel on peut vérifier toutes les propriétés des conducteurs de l'électricité voltaïque
A.C.P., t. 18, 1821, p. 88-107, 313-333 (contient p. 329-333 une note d'Ampère sur les rotations de Faraday).
17. Notes relatives au mémoire de M. Faraday, par MM. Savary et Ampère -
 1. *A. C. P.*, t. 18, 1821, p. 370-379 (sur les rôles respectifs de Savary et Ampère, voir p. 111).
 2. *Recueil*, p. 158-168.
18. *Exposé des nouvelles découvertes sur l'électricité et le magnétisme de MM. Ørsted, Arago, Ampère, H. Davy, Biot, Erman, Schweiger, de La Rive, etc... par MM. Ampère et Babinet* - Paris, février 1822 (BN : R 26 516)

Supplément à la traduction française de la 5^e édition du *Système de chimie* de T. Thomson, p. 166-256 Paris 1822 (pour la participation d'Ampère à cet ouvrage, voir p. 134). .

BIBLIOGRAPHIE

19. Réponse de M. Ampère à une lettre de M. le Professeur Van Beck sur une nouvelle expérience électro-magnétique -
 1. *J. Phys.*, t. 93, 1821, p. 447-467.
 2. *Recueil*, p. 169-198.
 3. *Coll. Mem.*, t. II, • 212-237.
20. Analyse des travaux de l'Académie Royale des Sciences, pendant l'année 1821, partie mathématique ; Nouvelles expériences électro-magnétiques, par M. Ampère -
 1. *M.A.R.S.*, t. V, 1821-1822, partie Histoire, p. 44-47.
 2. Tirage à part dans *Recueil de pièces, Institut 182/-1824* (Z 5032).
 3. *Bibl. Univ.*, t. 19, 1822, p. 244-247 (« Notice sur de nouvelles recherches relatives aux phénomènes électromagnétiques »).
21. Exposé sommaire des nouvelles expériences électro-magnétiques faites par différents physiciens depuis le mois de mars 1821 (lu le 8 avril 1822) -.
 1. *J. Phys.*, t. 94, 1822, p. 61-66.
 2. *Recueil*, p. 199-206.
 3. *Coll. Mem.*, t. II, p. 238-244.
22. Notes sur cet exposé -.
 1. *Recueil*, p. 207-236.
 2. *Coll. Mem.*, t. II, p. 244-269.
23. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques (obtenus par M. Ampère au mois de décembre 1821), extrait des notices lues à l'Académie Royale des Sciences dans les séances des 3 et 10 décembre 1821 et 7 janvier 1822-.
 1. *A.C.P.*, t. 20, 1822, p. 60-74.
 2. *Bibl. Univ.*, t. 20, 1822, p. 173-185.
 3. *Recueil*, p. 237-251.
 4. *Coll. Mem.*, t. II, p. 192-204.
24. Nouvelles expériences électro-magnétiques de MM. Faraday, Ampère, H. Davy et de La Rive -
 1. *Bull. Sc. Soc. Phil.*, 1822, p. 21-23.
25. Note sur une «Lettre à M. Ampère» de J.M. Van der Heyden -
 1. *J. Phys.*, t. 95, 1822, p. 70-71.
26. Extrait d'une lettre de M. Ampère à M. le Professeur de La Rive sur des expériences électro-dynamiques, et sur la formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de courants électriques (12 juin 1822) -.
 1. *Bibl. Univ.*, t. 20, 1822, p. 185-192.
 2. *Recueil*, p. 252-258.
 3. *Coll. Mem.*, t. II, p. 153-157 (version tronquée).
27. Mémoire sur la détermination de la formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs voltaïques (lu à l'Académie des Sciences le 10 juin 1822) -.
 1. *A.C.P.*, t. 20, 1822, p. 398-419.
 2. *Recueil*, p. 293-315.
 3. *Coll. Mem.*, t. II, p. 270-289.
28. Extrait d'une Note additionnelle au Mémoire précédent, lue à l'Académie des Sciences le 24 juin 1822 -
 1. *A.C.P.*, t. 20, 1822, p. 419-421.
 2. *Recueil*, p. 316-318.
29. Note lue à la séance du 24 juin 1822.
 1. *Coll. Mem.*, t. II, p. 290-292 (publiée d'après le manuscrit des Arch. Ac. Sc.).
30. Extrait d'une lettre adressée à M. Faraday (10 juillet 1822)-.
 1. *Correspondance*, t. II, p. 586-592.
 2. *Coll. Mem.*, t. II p., 293-299 (version tronquée).
31. De l'action qu'exerce la terre sur les conducteurs voltaïques -
 1. *Recueil*, p. 259-261.
 2. *Coll. Mem.*, t. II, p. 305-307.
32. Addition au Mémoire d'A. de La Rive (paru dans les *A.C.P.*, t. 21, 1822, p. 24-48)1.
 1. *A.C.P.*, t. 21, 1822, p. 48-53.
 2. *Recueil*, p. 286-292.
 3. *Bibl. Univ.*, t. 21, J 822, p. 29.

33. Notice sur quelques expériences nouvelles relatives à l'action mutuelle de deux portions de circuit voltaïque et la production des courants électriques par influence, et sur les circonstances dans lesquelles l'action électrodynamique doit, d'après la théorie, produire dans un conducteur mobile autour d'un axe fixe un mouvement de rotation continu, ou donner à ce conducteur une direction fixe .
Coll. Mem., t. II, p. 329-337 (publiée d'après un manuscrit des Arch. Ac. Sc.).
34. Extrait d'un mémoire lu à l'Académie Royale des Sciences le 16 septembre 1822-
1. *Bull. Sc. Soc. Phil.*, 1822, p. 145-147.
2. *Recueil*, p. 319-324.
35. Exposé méthodique des phénomènes électro-dynamiques et des lois de ces phénomènes
1. *Bull. Sc. Soc. Phil.*, 1822, p. 177-183.
2. *J. Phys.*, t. 95, 1822, p. 248-257 (avec addition).
3. *Recueil*, p. 325-344 (avec de nouvelles additions).
4. Tirage à part, fév. 1823, 26 p. in 8° (avec encore une addition) (BN : R Pièce 26517)
36. Extrait d'une lettre à M. Faraday (18 avril 1823)1.
1. *A.C.P.*, t. 22, 1823, p. 389-401.
2. *Recueil*, p. 365-378.
3. *Coll. Mem.*, t. II, p. 384-394.
4. *Correspondance*, t. II, p. 630-635 (version reçue par Faraday, plus courte)
37. *Recueil d'observations électrodynamiques* - Paris, 1822.
(La publication de cet ouvrage se fait entre l'été 1822 et l'été 1823, d'où plusieurs versions plus ou moins complètes: par exemple l'exemplaire de la Bibliothèque du Museum est incomplet par rapport à celui de la Sorbonne qui contient la lettre précédente à Faraday d'avril 1823; voir p. 136)
38. Note relative au mémoire de M. Savary -
1. *Recueil*, p. 354-364.
2. *Bibl. Univ.*, t. 24, 1823, p. 109-115 (version légèrement différente).
3. *Coll. Mem.*, t. II, p. 376-383 (version du *Recueil*).
39. Mémoire inédit portant la date du 24 novembre 1823 .
Société Française de Physique (nous n'avons pas pu voir ce mémoire signalé par J. Joubert dans *Coll. Mem.*, t. II, p.5, note 1).
41. Extrait d'un mémoire sur les phénomènes électrodynamiques par M. Ampère, lu le 22 décembre 1823 1.
1. *Bull. Sc. Soc. Phil.*, 1824, p. 79-85.
2. *Coll. Mem.*, t. If, p. 395-410 (publié d'après le manuscrit des Arch. Ac. Sc., texte identique au précédent jusqu'à la page 402, avec 8 pages supplémentaires).
42. Extrait d'un mémoire sur les phénomènes électrodynamiques, lu le 22 décembre 1823 .
A.C.P., t. 26, 1824, p. 134-161, 246-258.
43. Conséquences mathématiques de la formule par laquelle Ampère a représenté l'action mutuelle de deux éléments de courants électriques et comparaison de ces phénomènes avec ceux qui tiennent à l'action chimique de l'électricité. Présenté à l'Académie des Sciences dans la séance du 22 décembre 1823, lu dans les séances du 29 décembre 1823 et du 5 janvier 1824
Manuscrit autographe de 38 pages, Bibliothèque de la Ville de Lyon, Fonds Charavay. Recueil A 1, folios 91 à 114.
44. Extrait des séances de l'Académie Royale des Sciences, lundi 5 janvier 1824.
A.C.P., t. 25, 1824, p. 88-90 (non signé)
45. *Précis de la théorie des phénomènes électrodynamiques* pour servir de Supplément à son *Recueil d'observations électrodynamiques* et au *Manuel d'électricité dynamique* de Demonferrand - Paris, août 1824- (BN : R 26518). Tirage à part de la réf. 42, augmenté de trois Notes importantes.
46. *Description d'un appareil électrodynamique construit par M. Ampère* -
1. *A.C.P.*, t. 26, 1824, p. 390-411.
2. Tirage à part, juillet 1824, 24 p. 3. 2 édition, 1826 (BN : 8° R Pièce 7174)
47. Rapport sur un mémoire de M. Rousseau relatif à un nouveau moyen de mesurer la conductibilité des corps pour l'électricité, par MM. Ampère et Dulong- .
A.C.P., t. 25, 1824, p. 373-379.

BIBLIOGRAPHIE

48. Note sur une expérience relative à la nature du courant électrique, lue le 12 avril 1824, par MM. Ampère et Becquerel -
A.C.P., t. 27, 1824, p. 29-31.
49. Sur le mode de transmission des courants électriques et la théorie électrochimique -
 1. dans F. Moigno, *Traité de télégraphie électrique*, 1839, p. 222-240.
 2. Annexe III, p. 177.
50. Extrait d'un rapport fait à l'Académie des Sciences sur les piles sèches de M. Zamboni.
A.C.P., t. 29, 1824, p. 198-200.
51. Lettre de M. Ampère M. Gherardi sur divers phénomènes électrodynamiques (16 août 1825)-.
 1. *A.C.P.*, t. 29, p. 373-381
 2. *Coll. Mem.*, t. III, p. 217-223 (le dernier paragraphe est supprimé).
52. Mémoire sur une nouvelle expérience électrodynamique, sur son application à la formule qui représente l'action mutuelle de deux éléments de conducteurs voltaïques et sur de nouvelles conséquences déduites de cette formule, lu à l'Académie Royale des Sciences, le 12 septembre 1825-
 1. *A.C.P.*, t. 29, 1825, p. 381-404 et *A.C.P.*, t. 30, 1825, p. 29-41.
 2. Tirage à part, *Mémoire sur une nouvelle... de cette formule, suivi d'une lettre à M. Gherardi relative à l'explication de quelques phénomènes électrodynamiques*, 1825- . (Institut : Rec M 647° (n° 4)
 3. *Correspondance mathématique et physique des Pays-Bas*, t. I, 1825, p. 276-280 (extrait de la partie du mémoire publié dans les *A.C.P.*, t. 29).
53. Mémoire communiqué à l'Académie Royale des Sciences dans sa séance du 21 novembre 1825, faisant suite au mémoire lu dans sa séance du 12 septembre -
Coll. Mem., t. III, p. 194-202 (publié d'après le manuscrit des Archives de l'Académie des Sciences).
54. Extrait d'un mémoire sur l'action exercée par un circuit électrodynamique formant une courbe plane dont les dimensions sont considérées comme infiniment petites ; sur la manière d'y ramener celle d'un circuit fermé, quelles qu'en soient la forme et la grandeur ; sur deux nouveaux instruments destinés à des expériences propres à rendre plus directe et à vérifier la détermination de la valeur de l'action mutuelle de deux éléments de conducteurs ; sur l'identité des forces produites par des circuits infiniment petits, et par des particules d'aimant ; enfin sur un nouveau théorème relatif à l'action de ces particules, lu à l'Académie Royale des Sciences, le 21 novembre 1825-
 1. *Correspondance mathématique et physique des Pays-Bas*, t. II, 1826, p. 35-47.
 2. *Coll. Mem.*, t. III, p. 203-216.
 3. Tirage à part sous le titre *Précis d'un mémoire sur l'électrodynamique par M. Ampère de l'Institut de France*, Gand, 1825, 15 p. (Institut ; Rec HR 37 (t. II, n° 22)
55. Note sur une nouvelle expérience d'électrodynamique qui constate l'action d'un disque métallique en mouvement sur une portion de conducteur voltaïque pliée en hélice ou en spirale .
Nouveau Bull. de la Soc. Phil., 1826, p. 134.
56. Note sur quelques phénomènes électromagnétiques - (article non signé)
A.C.P., 32, 1826, p. 432-443.
57. *Théorie des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience* - novembre 1826 (BN : Res. m. R. 176)
 Reproduit avec modification des Notes, suppression de la table des matières dans les *M.A.R.S.*, 1823, t. IV, p. 175388, volume édité en mai 1827.
58. Mémoire sur l'action mutuelle d'un conducteur voltaïque et d'un aimant, présenté à la séance du 28 octobre 1826.
 1. *Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale de Bruxelles*, t. IV, 1827, p. 1-70.
 2. Tirage à part, suivi de la Lettre à M. Gherardi (réf. 51), 1826, 88 p. (BN : R 6846)
 3. *A.C.P.*, t. 37, 1828, p. 113-139 (seconde partie du mémoire seulement)
 4. Tirage à part du texte des *A.C.P.* sous le titre *Note sur l'action mutuelle (un aimant et d'un conducteur voltaïque*, 1828, 29 p. (BN : R p 2129)
 5. *Coll. Mem.*, t. III, p. 224-274.
59. Lettre à M. Le Docteur Gherardi -
 1. *Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale de Bruxelles*, t. IV, 1827, p. 71-88.
 2. Tirage à part, à la suite du mémoire précédent (réf. 58-2). \
 3. *Coll. Mem.*, t. III, p. 275-288.
60. Expériences sur les courants électriques produits par l'influence d'un autre courant, par MM. Ampère et Becquerel-
C.P., t. 48, 1831, p. 405-412.

- 61 Note sur une expérience de M. Hippolyte Pixii relative au courant produit par la rotation d'un aimant - *A.C.P.*, t. 51, 1832, p. 76-79.

II. Etudes sur Ampère et ses travaux scientifiques

Cette bibliographie ne comprend pas les études consacrées exclusivement à un aspect de l'œuvre d'Ampère autre que l'électrodynamique (en particulier la philosophie), ni celles qui ne sont que des notices reprenant des études déjà publiées. Quelques ouvrages sont cependant cités pour leur iconographie ou leurs tableaux de synthèse.

1. C.A. SAINTE-BEUVE, « Ampère, sa jeunesse, ses études diverses, ses idées métaphysiques, etc. », dans *Revue des Deux Mondes*, t. 9, 1837, p. 389-422; et dans *A.M. Ampère, Essai sur la Philosophie des Sciences*, t. II, 1843, p. I-LIX.
2. A. QUETELET, « Notice sur M. Ampère », dans *Annuaire de l'Académie Royale de Bruxelles*, t. II, 1837, p. 134-136.
(BN : 8² Z 981).
3. F. ARAGO - *Œuvres Complètes*, Notices biographiques, Ampère, t. If, 1854, p. 1-116 (Notice lue par extraits à l'Académie des Sciences le 21 août 1839).
4. E. ARAGO - *Biographie Universelle* - J. et L.G. MICHAUD, t. I, 1843, p. 596-613.
5. E. LITTRÉ, « Physique », dans *A.M. Ampère, Essai sur la philosophie des Sciences*, t. II, 1843, p. LX-XCVI.
6. C. JARRIN, « Ampère, membre de la Société d'Emulation de l'Ain », dans *Annales de la Société d'Emulation de l'Ain*, 1872, p. 87-131.
(BN : S 17387)
7. Mme C. HEUVREUX *Journal et correspondance d'André-Marie Ampère* (de 1793 à 1805), 2 vol., 1869.
– *André-Marie Ampère et Jean-Jacques Ampère, Correspondance et Souvenirs* (de 1805 à 1864), 1875.
(Ces deux volumes sont intéressants non pour les lettres, souvent coupées ou mélangées, mais pour les passages d'introduction)
8. C.A. VALSON, *La vie et les travaux d'André-Marie Ampère*, Lyon, 1886.
9. A. CORNU, *Discours pour l'inauguration de la statue d'A.M. Ampère* (8 octobre 1888), Lyon, 1889. (BN : L 7k 26525)
10. J. BUCHE, *Histoire du Studium, collège et lycée de Bourg-en-Bresse*, Bourg, 1898. (BN : 8° R 15511)
11. H. POINCARÉ, « A propos des expériences de M. Crémieu », dans *Revue générale des sciences*, t. 12, 1901, p. 994.
12. P. DUHEM, *La théorie physique, son objet, sa structure*, Paris, 1906.
13. *Cérémonie du centenaire des découvertes d'Ampère*, Institut de France, 1921.
14. *Revue générale de l'électricité*, 12, Supplément, numéro spécial novembre 1922. (Articles de P. Appell, M. Brillouin, L. de Launay, A. Pérot, J.B. Pomey, P. Boucherot, G. Gouy, H. Ciquet, J. Joubert), p. 11-77.
15. L. DE LAUNAY, *Le grand Ampère d'après des documents inédits*, Paris, 1925.
16. P. JANET, *Notes et souvenirs*, Paris, 1933.
17. J. BUCHE, *L'école mystique de Lyon 1776-1847*, Paris, 1935.
18. L. MALLEZ, *Ampère professeur à Bourg*, Lyon, 1936. (BN : 4° Ln²⁷ 81680)
19. M. LEWANDOVSKI, *A.M. Ampère, la science et la foi*, Paris, 1936 (BN : 8° Ln²⁷ 80828)
20. A. et E. FRANCESCHINI, « A.M. Ampère », dans *Dictionnaire de biographie française*, t. 1T, Paris, 1936.
21. C. FADRY, « Ampère et l'Ecole Polytechnique », dans *Euvres choisies*, Paris, 1938, p. 654-668.
22. L. DE BROGLIE, « Un génie tourmenté, A.M. Ampère », dans *Continu et discontinu en physique moderne*, Paris, 1941, p. 241-266.
23. L.P. WILLIAMS, « Ampère's electrodynamical model », dans *Contemporary Physics*, 1962, vol. 4, n° 2, p. 113-116.
24. L.P. WILLIAMS, « Ampère », dans *Dictionary of scientific biography*, t. I, 1970, p. 139-147.
25. R.A.R. TRICKER, « Ampère as a contemporary physicist », dans *Contemporary Physics*, 1962, n° 6, p. 453-469.
26. R.A.R. TRICKER, *Early Electrodynamics*. (Collection « Selected Readings in physics »), New York, 1965.
L. DOMENACH, « Relations d'Ampère avec les savants genevois », dans *Bulletin de la Société des Amis d'A.M. Ampère*, 1963, p. 12-15.
28. L. POUDENSAN, *Ampère, un savant dans le texte*, Paris, 1964.
29. D.L. GARDINER, « Ampère and his English acquaintances », dans *British Journal for history of science*, 1965, vol. 2, p. 235-245.
30. P.G. HAMAMDJIAN, « Genèse des idées d'Ampère en électromagnétisme », dans *Actes du 12^e congrès international d'histoire des sciences*, 1968, vol. 5.
– « La définition du courant électrique par Ampère », dans *Actes du 13^e congrès international d'histoire des sciences*, 1971, vol. 6.

BIBLIOGRAPHIE

31. J. MERLEAU-PONTY, « L'électrodynamique d'Ampère », dans *Leçons sur la genèse des théories physiques*, Paris, 1974 p. 69-112.
32. Bibliothèque de la Ville de Lyon, *A. Ampère, exposition organisée pour le deuxième centenaire de sa naissance*, Lyon, 1975. (BN: 4² V 31412).
33. P. COSTADEL, « L'activité scientifique d'Ampère », dans *Revue d'histoire des sciences*, t. XXX, n° 2, 1977, p. 105-112.
34. M. SADOUN-GOUPIL, « Esquisse de l'œuvre d'Ampère en chimie », dans *Revue d'histoire des sciences*, t. XXX, n° 2, 1977, p. 125-141.
35. A. KASTLER, « Ampère et les lois de l'électrodynamique », dans *Revue d'Histoire des sciences*, t. XXX, n° 2, 1977, p. 142-157.
36. J. ROSMORDUC, « Ampère et l'optique : une intervention dans le débat sur la transversalité de la vibration lumineuse », dans *Revue d'histoire des sciences*, t. XXX, n° 2, 1977, p. 159-167.
37. E. YAMAZAKI, « Sur l'électrodynamique d'Ampère », dans *Memories of the Institute of sciences and technology*, Meiji University, vol. 16, n° 12, 1977.
38. C. BLONDEL, « Sur les premières recherches de formule électrodynamique par Ampère (octobre 1820) », dans *Revue d'histoire des sciences*, t. XXXI, n° 1, 1978, p. 53-65.
39. R. TATON, « Repères pour une biographie intellectuelle d'Ampère », dans *Revue d'histoire des sciences*, t. XXXI, n° 3, 1978, p. 233-248.
40. P.G. HAMAMDJIAN, « Contribution d'Ampère au 'théorème d'Ampère' », dans *Revue d'histoire des sciences*, t. XXXI, n° 3, 1978, p. 249-268.
41. Périodique : *Bulletin de la Société des Amis d'A.M. Ampère* (Musée de l'électricité, 69-Poleymieux). (BN : 8°R 38643 4° R 14073)

III. Etudes sur l'électromagnétisme

1 – Historiques contemporains des découvertes

- M. FARADAY, « Historical sketch of electromagnetism », dans *Annals of Philosophy*, 1821, t. II, p. 195-200, 274-290.
- A. DE LA RIVE, « Esquisse historique des principales découvertes faites dans l'électricité depuis quelques années », dans *Bibliothèque Universelle, sciences et arts*, I 833, t. 52, p. 225 et 404, t. 53, p. 70 et I 70.
- A. BECQUEREL, *Traité expérimental de l'électricité et du magnétisme*, t. I, 1834, p. 6-407 (avec bibliographie).
- A. et E. BECQUEREL, *Résumé de l'histoire de l'électricité et du magnétisme*, Paris, 1858.

2 - Etudes modernes

- P. F. MOTTELAY, *Bibliographical history of electricity and magnetism*, Londres, 1822 (ne dépasse guère 1820).
- R. TATON, *Histoire générale des sciences*, t. III, vol. I, chap. V, 1961.
- E. VERDET, *Œuvres de E. Verdet publiées par les soins de ses élèves, Conférences de physiques faites à l'Ecole Normale*. t. IV, 1^{re} partie, 1872.
- P. DUHEM, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, Paris, 1891.-*Les théories électriques de J.C. Maxwell*, Etude historique et critique, Paris, 1902.
- J.J. FAHIE, « Magnétisme, électricité et électromagnétisme jusqu'à Faraday ». dans *L'enseignement scientifique*, 7^e année, octobre 1933 à juin 1934 (traduction du numéro de novembre 1931 du *Journal of the Institution of Electrical Engineers*).
- R. APPLEYARD, *Pioneers of electrical communication*, Londres, 1930.
- J. DAUJAT, *Origine et formation de la théorie des phénomènes électriques et magnétiques*, Paris,
- E. BAUER, *L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*, Paris, 1949.
- E. WHITTAKER, *A history of the theories of Aether and Electricity*, Londres, 1951. .
- L.P. WILLIAMS, *The origins of field theory*, New York, 1965.1
- R.A.R. TRICKER, *Early electrodynamics*, 1965.

IV. Etudes sur les autres physiciens, leur influence théorique et institutionnelle

1 - Aspects institutionnels et sociaux

- L. SÉDILLOT, *Les professeurs de mathématiques et de physique générale au Collège de France*, Rome, 1869 (BN : 4° R 1048)
- Le Collège de France 1530-1930*. Livre jubilaire composé à l'occasion de son quatrième centenaire, Paris, 1930.
- M. DAUMAS, *Les savants d'Arcueil et la science du XIX^e siècle*. Conférence du Palais de la Découverte, 15 mai 1954.

- M. CROSLAND, *The Society of Arcueil*, Londres, 1967.
H. GOUIN, *La jeunesse d'Auguste Comte et la formation du positivisme*, Paris, 1933-1941,
R. FOX, « Scientific enterprise and the patronage of research in France 1800-1870 », dans *Minerva*, 1973, vol. XI, p. 442-473 (Sorbonne).
M.P. CROSLAND, « The development of a professional career in Science in France », dans *The emergence of science in western Europe*, M. CROSLAND, 1975, p. 139-159.

2- Aspects théoriques

- L.P. WILLIAMS, « The physical sciences in the first half of the 19th century : problems and sources », dans *History of science*, 1962, vol. 1, p. 1-15.
A.E. WOODRUFF, « Action at a distance in 19th century electrodynamics », dans *Isis*, 1962, vol. 53.
I. B. COHEN, « Conservation and the concept of electrical charge : an aspect of philosophy in relation to physics in the 19th century », dans *Critical problems in the history of science*, M. CLAGETT, 1959, p. 357-383.
J.W. HERIVEL, « Aspects of french theoretical physics in the 19th century », dans *British Journal for the history of science*, 1966, vol. 10, p. 109-132.
T. BROWN, « The electric current in early 19th french physics », dans *Historical studies in physical sciences*, 1969, vol. I, p. 61-103.
R. FOX, « The rise and fall of laplacian physics », dans *Historical studies in physical sciences*, 1972, vol. IV, p. 89-136.
K.L. CANEVA, « From galvanism to electrodynamics : the transformation of German physics and its social context », dans *Historical studies in physical sciences*, 1978, vol. IX, p. 63-159.

3-Etudes sur quelques autres physiciens

(Il faut ajouter les Notices du *Dictionary of Scientific Biography*, C.C. GILLIPSIE, pour chaque savant).

ARAGO :

- A. DE LA RIVE, *François Arago*, Genève, 1853.
M. DAUMAS, *Arago*, Paris, 1942.
R. AUDUBERT, *Arago et son temps*, Conférence du Palais de la Découverte, 19 décembre 1953.

BIOT :

- F. LEFORT, *Notice sur la vie et les travaux de J.B. Biot*, Paris, 1868.
E. PICARD, *la vie et l'œuvre de J.B. Biot*, Paris, 1927.
E. FRANKEL, *J.B. Biot : the career of a physicist in 19th century France*. - Thèse publiée d'après microfilm, Princeton, 1972 (Centre A. Koyre).

GAY-LUSSAC :

- E. BLANC et L. DELHOUME, *La vie émouvante et noble de Gay-Lussac*, Paris, 1950.
M. CROSLAND, *Gay-Lussac, scientist and bourgeois*, New York, 1978.

FRESNEL :

- A. Fresnel *Œuvres complètes*, Étude d'E. VERDET, t. I, Paris, 1866.
R. SILLIMAN, « Fresnel and the emergence of physics as a discipline », dans *Historical studies in physical sciences*, 1972, vol. 4, p. 137-162.

ØRSTED :

- K. MEYER, « Scientific life and works of H.C. Ørsted », in H.C. Ørsted, *Naturvidenskabelige skrifter - Scientific papers*, t. I, Copenhague 1920.
J. GUILLAUME, « Esquisse biographique », dans H.C. Ørsted, *L'esprit dans la nature*, Bruxelles, 1961.
E. de BEAUMONT, *Eloge historique de J.C. Ørsted*, Paris, 1863.
A.C. STAUFFER, « Persistent errors regarding Ørsted's discovery of electromagnetism », dans *Isis* 1953 p. 307-310. - « Speculation and experiment in the background of Ørsted's discovery », dans *Isis*, 1957, • 33-50
B. DINER, *Ørsted and the discovery of electromagnetism*, New York, 1961.
J. P. GRARD, « Sur quelques problèmes concernant l'œuvre d'Ørsted en électromagnétisme », dans *Revue d'histoire des sciences*, 1961, t. 14, p. 297-312.
P.G. HAMAMDJIAN, *Ørsted et la naissance de l'électromagnétisme*. Thèse 3^e cycle, Sorbonne, 1966.

G. DE LA RIVE :

- « Notice biographique sur le professeur Gaspard de La Rive (1770-1834) », dans *Bibliothèque Universelle*, sciences et arts, t. 55, 1834, p. 308-338.

BIBLIOGRAPHIE

A DE LA RIVE :

J. L. SORET, « Notice biographique : A. de La Rive », dans Archives des Sciences physiques et naturelles, t. 60, 1877, p. 5-253.

J.-B. DUMAS, Discours et éloges académiques, Paris, 1885, t. I, p. 251-305.

FARADAY:

J. TYNDALL, Faraday inventeur. - Traduit de l'anglais par l'Abbé Moigno, Paris, 1868.

A. DE LA RIVE, Notice sur M. Faraday, sa vie et ses travaux, Genève, 1867.

J.-B. DUMAS, Discours et éloges académiques, Paris, 1885, t. I, p. 51-124.

L.P. WILLIAMS, « Faraday and the structure of matter », dans Contemporary Physics, 1960, vol. 2, p. 93-105.

— Michael Faraday, a biography, Londres, 1965.

R.A.R. TRIKER, The contribution of Faraday and Maxwell to electrical science, Oxford, 1966.

INDEX

Aepinus F. 13, 175, 176
 Ampère J.J. 63, 145
 Antinori V. 46, 51
 Arago F. 27, 37-41, 44, 50-54, 62, 67, 74, 79, 80, 85, 89, 91, 106, 107, 140, 154, 164, 167, 173
 Avogadro 64

 Babbage C. 36, 165
 Babinet J. 58, 134, 136
 Ballanche 59, 63
 Barbeau-Dubourg J. 28
 Bardi G. 50
 Barlow P. 142
 Barret 63
 Beccaria G. 28
 Beck (van) A. 48-51, 100, 105, 115, 119-123, 155
 Becquerel 143, 157, 160, 184
 Berkeley 64
 Berthollet C.L. 38, 136
 Berzélius J.J. 38, 40, 44-47, 54, 103
 Binet 162
 Biot J.B. 11-19, 22-28, 36, 38, 40, 41, 47, 48, 54-59, 67, 77, 79, 81, 84, 91, 95, 98-107, 117, 125, 139-142, 145, 155, 157, 172
 Bockmann 51
 Boisgiraud 45, 49, 72
 Bonaparte 61, 62
 Boscovich 39
 Bossut 172
 Boussingault J.B. 37
 Bowditch 141
 Brande W. 18
 Bredin 63, 65, 82, 105, 109, 129, 142
 Bréguet 58, 95
 Brewster D. 15
 Buffon G.L. 171

 Campredon (Gal) 74
 Candolle A. de 44
 Carlisle 25, 29
 Cauchy 103, 162, 163
 Cavendish H. 14
 Chevreul 38-40
 Clairaut A. 171
 Coleridge S. 39
 Colladon J.D. 52, 154, 164, 167, 185
 Collinson P. 28
 Condillac 63
 Configliachi P. 51
 Coulomb C. 11-19, 22, 23, 29, 35, 36, 41, 44, 47, 56, 59, 62, 63, 79, 80, 121, 125, 139-142, 152, 153, 157, 158, 175
 Crémieu 90
 Cumming J. 136
 Cuvier G. 37

Daburon (Abbé) 171
 Dalibard 28
 Davy H. 22, 25, 32, 36, 38-40, 46, 48, 50-54, 64, 66, 70, 103, 106, 115, 136, 155, 173
 Delambre J.B. 63, 67, 172
 Demonferrand 68, 133, 135, 136, 141, 142
 Descartes R. 14, 59
 Desormes 30
 Despretz C. 74
 Dufay C.F. 74
 Duhamel J.M. 148
 Duhem P. 11, 90, 101
 Dulong P.L. 36, 44, 74, 105, 107, 165
 Dumas J.B. 18, 40, 44, 142
 Dumotier 74

 Erman P. 20, 26, 29, 48-52, 70, 103, 106, 163
 Euler L. 162
 Eyck (van der) J. 48, 66, 103, 105, 125, 126

 Fabroni 25
 Fabry C. 139
 Faraday M. 11, 18, 22, 26, 29, 30, 32, 36, 38-41, 45, 48, 52, 53, 64, 66, 89, 105, 106, 109-117, 123-127, 131, 133, 136, 139, 145, 154, 155, 160, 165
 Fechner 33
 Férussac (baron de) 36
 Fichte 38
 Fourier 37, 163 .
 Franklin B. 13, 28, 29, 62, 175, 176
 Fresnel A. 37, 41, 52, 65, 68, 74, 88-90, 98-102, 104, 107, 113, 117, 118, 121, 123, 145, 162-167, 185

 Galvani 21, 35
 Gauss 32
 Gautherot N. 20
 Gay-Lussac I.L. 26, 37, 39, 51, 56, 70, 84, 94, 120, 140, 144, 149, 173
 Gazzeri G. 46, 51
 Gherardi 136, 146
 Gilbert L.W. 32, 36
 Gillet de Laumont 67
 Goethe 29
 Grassmann 128
 Green G. 32, 156
 Grotthus 156
 Guillaume J. 41
 Guizot 37

 Hachette J. 30, 110
 Haüy R.J. 18, 19, 22, 23
 Herschell 36, 165
 Heyden (van der) J.M. 48, 122
 Humboldt (van) A. 29, 56, 74

- Joubert J. 66, 68, 99, 142
 Kant I. 29, 38, 63, 64
 Képler 163
 Lagrange 18, 65, 172
 Lalande 63
 Laplace (de) P.S. 15, 16, 23, 29, 36, 38, 41, 55, 57, 74, 81, 98, 104, 107, 144, 167
 La Rive (de) A. 14, 32, 35, 40, 66, 77, 109, 112, 131-136, 142, 145, 163, 165
 La Rive (de) G. 36, 39, 40, 44, 48, 50, 54, 66, 103, 105, 123, 124, 129-131, 155
 Launay (de) L. 12, 66
 Lavoisier 59, 173, 175
 Lefort F. 41
 Lehot C.J. 28
 L'Hospital (marquis de) G.F. 171
 Libes A. 14, 15
 Littré E. 104, 107
- Maine de Biran 63
 Malus 36, 41
 Marcet A. 44
 Marum (van) M. 22, 28
 Maurice (baron) 102, 106, 123, 135, 160
 Maxwell J.C. 11, 67, 161, 169
 Mazéas 171
 Métherie (de la) 25
 Meyer K. 37, 42
 Moigno (Abbé) 143, 155, 163, 177, 185, 186
 Moll G. 51
 Mollet 49, 171
 Monge G. 41
 Mussy (de) 74
- Napoléon 21, 30, 35
 Newton f. 11, 68, 104, 167, 169, 175
 Nicholson 25, 29
 Nobili L. 146
- Ørsted H.C. 12, 17, 19, 21-26, 29-32, 35, 35-54, 64-66, 69-74, 79, 82, 99, 105-107, 121, 137, 142, 155, 156, 167, 172
 Ohm G.S. 36, 82, 165
- Petit A. 37, 107
 Pictet M.A. 40, 45, 46, 49, 51, 130
 Pixii 103, 131, 145, 165
 Poenitz 45 '
 Poincaré H. 90
 Poinsot 41
- Poisson S. 14-17, 29, 32, 35-37, 74, 107, 152, 153, 160
 Pouillet C. 48, 50, 73, 142, 154, 182
 Prechtl J. 30, 47, 48, 70
 Prévost P. 44, 142
- Quételet A. 154
- Racine 171
 Récamier (de) Mme 145
 Reid T. 63
 Rendu 74
 Ridolfi C. 46, 51
 Ritter J. 20, 29-32, 38
 Rivard 171
 Roche 111
 Roget 136
 Rousseau J.J. 171
 Roux Bordier 63, 100, J 29
- Sainte-Beuve 61
 Savart F. 11, 12, 36, 48, 55, 56, 98
 Savary F. 55, 58, 111-114, 125, 135-144, 155-158
 Schelling 29, 31
 Schiller 29, 41, 154
 Schlegel F. 38
 Schweigger J.C. 32, 44, 50, 53, 104
 Serres (de) M. 25, 31
 Simon 38
 Singer G. 15, 27
 Sommerfeld A. 11
 Sturgeon 86
 Sue P. 25
 Sutières-Sarcey 171
 Swinden (van) 13, 28, 29
- Thénard 22, 26, 39, 94, 173
 Thillaye J.B. J 5
 Thomson T. 18, 38, 134
- Volta A. 12, 19, 22-26, 35, 38-40, 61, 63, 81 155
 Voltaire F.M. 171 °
 Virgile 171
- Walker A. 27
 Welter 51, 70, 120, 140, 142, 144, 149
 Wilcke S. 28
 Winterl J. 29, 38
 Wollaston 22, 25, 47, 52, 53, 70, 155
- Young T. 88, 163

TABLE DES MATIÈRES

Abréviations	10
Introduction	11
 CHAP. I : L'arrière-plan conceptuel et expérimental : électricité, magnétisme et voltaïsme en 182.	13
I - <i>Les théories newtoniennes de l'électricité et du magnétisme de 1785 à 1820</i>	13
1) Charles Coulomb	13
2) Les scepticismes rencontrés par sa théorie	14
3) L'électrostatique : Poisson, Laplace	15
4) Le magnétisme	16
5) Conséquences des succès newtoniens	18
II - <i>Le voltaïsme</i>	19
1) Les résultats des expériences galvaniques :	20
2) Les essais d'interprétation électrostatique de la pile	22
La théorie du contact	22
La théorie ondulatoire d'Ørsted	23
3) Les interprétations électrochimiques de la pile	25
III - <i>Les recherches de liens entre électricité, magnétisme et voltaïsme</i>	21
1) Les liens électricité « ordinaire » - magnétisme	27
2) Les théories unitaires	29
 CHAP. II : L'électromagnétisme : découverte et premières recherches	35
I <i>Vie scientifique et formation intellectuelle des physiciens dans les principaux pays européens</i> . .	35
1) Diffusion et organisation de la recherche	35
2) Formation intellectuelle des principaux intervenants	37
II <i>La découverte d'Ørsted et ses difficultés conceptuelles</i>	41
1) « Ce que promet l'esprit, la nature le tient »	41

III -Les théories explicatives avancées	45
1) L'identité entre électricité et magnétisme	45
2) La magnétisation temporaire du fil conducteur	46
3) L'hypothèse d'Ampère	48
IV - Recherches expérimentales qualitatives.	48
1) Influence de la structure de la pile sur l'effet électromagnétique	49
2) Effets magnétiques du courant électrique	49
3) Action d'un aimant sur un courant	49
4) Essais d'induction	49
5) Action magnétique de l'électricité ordinaire	53
6) Etude du courant électrique	53
7) Conclusion	54
V -La loi de Biot-Savart-Laplace	55
CHAP. III : Les fondements de la théorie électrodynamique (sept. 1820 -janv. I 82 I)	61
I Présentation de l'ensemble de l'œuvre d'Ampère	61
1) Les principales recherches d 'Ampère avant l'électrodynamique	61
2) L'œuvre électrodynamique d'Ampère	65
II -L'élimination des fluides magnétiques (sept. - oct. 1820)	65
1) Premier mémoire d'Ampère: 18 et 25 septembre 1820	69
18 septembre.	
a) Les deux « résultats généraux» de l'expérience d'Ørsted : rotation et attraction	69
b) Mise en évidence expérimentale des deux effets : rotation et attraction	71
c) Action de la pile	72
25 septembre.	
d) Spirales et hélices	75
e) Les Conclusions apportées par Ampère à son premier mémoire	77
2) Deuxième mémoire : 9 octobre I 820	77
a) Opposition électrostatique-électrodynamique	78
b) Un échec expérimental : rotation d'un courant	80
c) La nature et l'origine du courant électrique	81
cl) La première recherche de formule électrodynamique	83
3) Troisième mémoire : 16 octobre 1820	85
4) Quatrième mémoire : 30 octobre 1820	86
III -L'établissement de la loi d'action entre deux éléments de courants	87
1) Cinquième mémoire : 6 novembre 1820	87
a) Distinction entre deux types d'hélices	87
b) Justification de la loi d'addition par la considération de l'éther	88
2) Sixième mémoire : 13 novembre 1820, essais de création de courant par le magnétisme.	89

TABLE DES MATIÈRES

3) Septième mémoire : 4 et 11 décembre 1820	90
4 décembre : la formule électrodynamique	90
a) La force élémentaire est une force centrale	90
b) Démonstration de la loi de Biot sur l'action d'un courant infini	90
c) La loi d'addition et la nullité d'action entre éléments orthogonaux	90
11 décembre	
4) Huitième mémoire : 26 décembre 1820, expérience du « fil sinueux »	96
5) Neuvième mémoire : 8 et 15 janvier 1821, calculs sur l'expérience de Biot	98
6) Neuvième mémoire : 8 et 15 janvier 1821, calculs sur l'expérience de Biot.	101
7) Interruption due à la maladie.	103
8) L'accueil fait au mémoire d'Ampère, en France et à l'étranger.	104
 CHAP. IV : Défense et illustration de la nouvelle théorie électromagnétique.	109
 I - <i>Les rotations continues (hiver 1821-1822)</i>	109
1) Modifications de l'expérience de Faraday	109
2) Critique par Ampère des explications de Faraday	109
3) Rotations continues sans aimants	113
4) Rotation d'un aimant autour de son axe	114
5) Conséquences théoriques des expériences de rotations continues	117
 II <i>La théorie du magnétisme</i>	118
1) Double hypothèse des courants préexistants et particuliers	118
2) Liens entre les courants particuliers et la matière	121
3) Disposition des courants dans les aimants	123
 III <i>La détermination complète de la formule électrodynamique</i>	125
1) La découverte d'un troisième « cas d'équilibre »	125
2) La traduction mathématique de la condition d'équilibre	127
 IV <i>Les expériences de Genève (septembre 1822)</i>	130
1) Action magnétique de la terre	130
2) Répulsion des parties d'un même conducteur	132
3) Création de courants par influence	133
 VI <i>Les essais de synthèse 1822-1824</i>	134
1) L'« Exposé des nouvelles découvertes sur l'électricité et la magnétisme » d'Ampère et Babinet	134
2) L'« Exposé méthodique des phénomènes électrodynamiques » d'Ampère	135
3) Le « Recueil d'observations électro-dynamiques » d'Ampère	135
4) Le « Manuel d'électricité dynamique » de J.F. Demouffrand	136

CHAP. V : Développements mathématiques et nouvelles intuitions physiques	139
I - <i>Les mémoires de Savary et Demonferrand (février 1823)</i>	139
II - <i>Les développements analytiques d'Ampère</i>	143
1) L'intervention de la directrice.	145
2) Soucis divers, interruption de la recherche	145
3) Le nouveau troisième cas d'équilibre (septembre-novembre 1825).	146
4) Autres expériences théoriques	148
5) L'équivalence « circuit-feuillet magnétique » et les « lignes d'aimantation » ;	150
6) La question du « couple primitif ».	154
III - <i>Le courant électrique</i>	155
IV - <i>Les dernières versions de la théorie du magnétisme</i>	157
1) Hypothèse des solénoïdes rectilignes	158
2) Hypothèse des solénoïdes toriques.	158
3) Abandon des solénoïdes toriques et de l'hypothèse des courant préexistants.	160
V - <i>L'éther et son rôle dans la propagation des phénomènes électromagnétiques</i>	161
VI - <i>Les dernières recherches</i>	164
Conclusion	166
Annexe I.	171
Annexe II.	175
Annexe III.	177
Bibliographie.	187
Index.	197
Table des matières	199