

André-Marie Ampère

et la naissance de l'électrodynamique

Hélène Fischer (helene.fischer@univ-lorraine.fr)

Maitresse de conférences à l'Université de Lorraine - Chargée de mission pour la vulgarisation scientifique à l'IJL Institut Jean Lamour (IJL, CNRS et Université de Lorraine), Campus Artem, 2 allée André Guinier, BP 50840, 54011 Nancy Cedex

Dès 1801, Ampère a l'intuition fulgurante que magnétisme et courant électrique sont deux facettes différentes du même phénomène. En 1820, sa vie est bouleversée par l'expérience d'Ørsted, qui a observé qu'une aiguille aimantée est déviée sous l'action d'un courant électrique parcourant un fil placé à proximité.

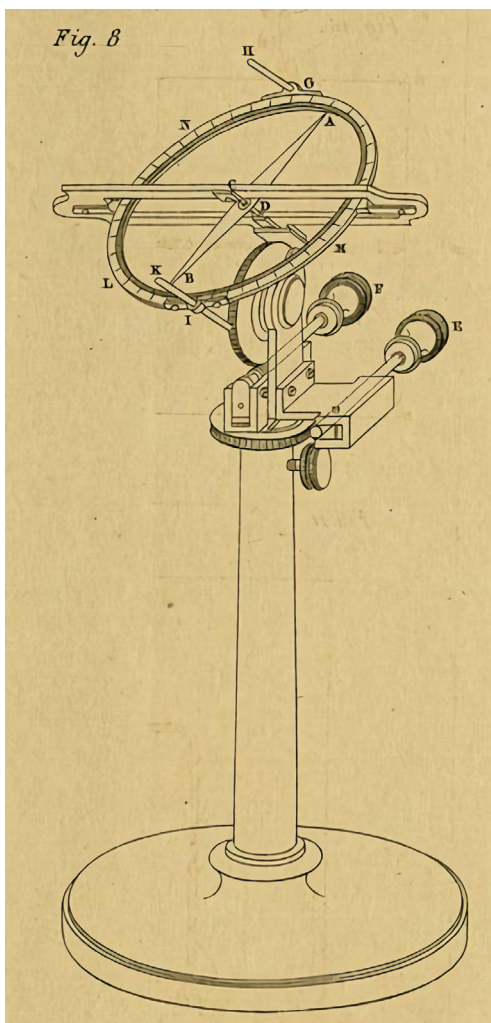
Pour en proposer une explication, Ampère suppose avec audace l'existence de courants électriques dans les aimants. Avec frénésie, il n'a alors de cesse de concevoir de nouveaux dispositifs expérimentaux pour prouver la véracité de son hypothèse et établir la formule élémentaire et universelle qui fera de lui le « Newton de l'électricité ».

Le contexte historique

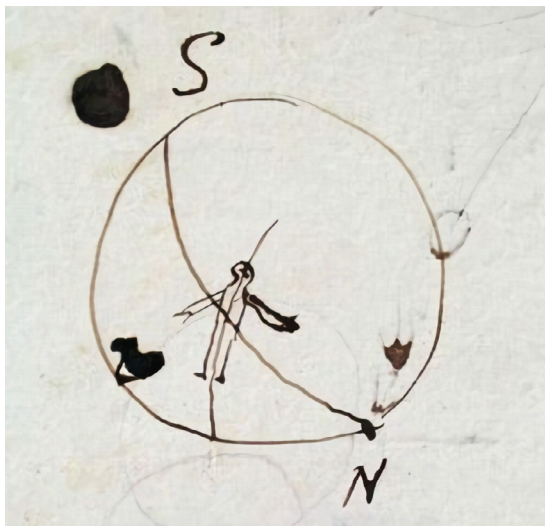
Au siècle des Lumières, l'électricité est une science qui se donne en spectacle dans de grands salons réunissant savants et amateurs. Progressivement, le concept d'électricité devient sujet à débats : on ne parvient alors pas à savoir s'il existe une seule ou plusieurs espèces d'électricité. Plusieurs conceptions se côtoient : celle à un fluide unique prévaut en Angleterre avec Henry Cavendish, alors qu'en Italie, Alexandre Volta parle d'atmosphères électriques et qu'en France, c'est la conception à deux fluides, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, qui l'emporte. Mais en fait, le débat majeur de la fin du XVIII^e siècle porte plutôt sur les explications à apporter aux phénomènes d'électrisation observés : pour certains, convaincus par les preuves sensorielles des effluves de matière subtile ou autres

« atmosphères électriques », les phénomènes électriques seraient dus à des actions de contact, alors qu'ils s'expliqueraient uniquement par des actions attractives ou répulsives s'exerçant à distance, sans intermédiaire matériel, pour les partisans de l'approche newtonienne. Simultanément, la question des rapports entre électricité et magnétisme interroge : on se demande en particulier s'il existe une véritable analogie entre la force électrique et la force magnétique.

En s'appuyant sur des expériences extrêmement précises et rigoureuses grâce au développement de nouveaux dispositifs expérimentaux comme la balance de torsion, Charles-Augustin Coulomb (1736-1806), convaincu par la conception à deux fluides et l'approche newtonienne, montre que la force s'exerçant entre deux objets chargés électriquement suit une loi d'action à distance en $1/d^2$. Coulomb s'intéresse



1. Boussole astatique inventée par Ampère. (Mémoire sur les effets du courant électrique, présenté à l'Académie royale des sciences en 1820).



2. Le bonhomme d'Ampère. (Archives de l'Académie des sciences).

aussi aux fluides magnétiques et propose de les traiter par analogie avec les fluides électriques : il fait donc l'hypothèse de deux fluides magnétiques, l'un « austral », l'autre « boréal », qui ne peuvent se déplacer librement à l'intérieur d'un aimant, et propose une expression des forces magnétiques en $1/d^2$. Il explique l'expérience de l'aimant brisé, qui donne toujours naissance à deux aimants après chaque cassure, en supposant les deux fluides répartis de façon équivalente dans tout l'aimant dans des « molécules aimantaires ». Mais, son approche du magnétisme reste fragile, car elle s'appuie sur très peu de résultats expérimentaux.

Les travaux de Coulomb, renforcés par les développements mathématiques de Siméon-Denis Poisson (1781-1840), sont très largement diffusés en France. Jean-Baptiste Biot (1774-1862) en particulier, est convaincu par le parallélisme établi entre électricité et magnétisme, renforcé par le parallélisme avec la théorie de l'attraction universelle du fait de la loi radiale d'action à distance en $1/d^2$ observée dans chaque cas. C'est ainsi qu'émerge en France une unité formelle tout à fait séduisante entre les trois branches de la physique que sont la gravitation, l'électricité et le magnétisme. Cette unité, renforcée par l'autorité mathématique, induit le sentiment de toute puissance que procure un édifice intellectuel apparemment inébranlable, s'opposant de fait à l'introduction de toute nouvelle théorie du

magnétisme. Les théories newtoniennes supposant de plus une indépendance totale d'action et de cause entre phénomènes distincts, toute recherche d'une action réciproque entre magnétisme et électricité est impossible. Et pourtant, le comportement d'une aiguille aimantée qui perd le Nord sous l'effet de la foudre, interpelle mais reste sans réponse.

Au début du XIX^e siècle, émerge dans les pays germaniques un mouvement de pensée intitulé la *Naturphilosophie*, qui propose une vision romantique de la nature. Localement, des scientifiques s'opposent à la philosophie newtonienne et affirment l'unité profonde de la nature et des phénomènes observés, malgré leur diversité apparente. Apparaît alors l'idée d'une unité possible entre phénomènes électriques et magnétiques. Toutes sortes d'analogies sont établies, certaines menant à des conclusions hasardeuses, à l'origine du mépris exprimé par certains au sujet de ce mouvement de pensée. Le physicien danois Hans Christian Ørsted (1777-1851), adepte de la *Naturphilosophie*, est raillé quand il présente à Paris, en 1803, les travaux de Wilhem Ritter (1776-1810) visant à démontrer l'identité de comportement entre une pile et un aimant. Suite à cette mésaventure, il s'éloigne de cette forme de pensée trop spéculative, mais il conserve en lui un rêve d'unité, et développe une exigence de rigueur scientifique issue de la démarche expérimentale.

1820 : la découverte de Hans Christian Ørsted (1777-1851)

Hans Christian Ørsted est contemporain de l'apparition des premières piles d'Alexandre Volta (1745-1827), sources de nombreuses interrogations. Aucun consensus n'émerge alors, ni sur la création et la circulation du fluide électrique dans les conducteurs, ni sur les notions de circuit ouvert et fermé, ni sur celles de courant et de tension. On tente donc d'expliquer le fonctionnement de la pile grâce à l'électrostatique. Ørsted s'intéresse au sujet et propose une hiérarchie entre les diverses formes d'électricité : l'électricité ordinaire, forme violente issue des expériences d'électrisation, l'électricité galvanique, forme plus

« latente » produite par la pile de Volta, et enfin le magnétisme, forme la plus « latente ». Persuadé que seules les formes d'électricité aux activités voisines peuvent interagir, il a l'idée, en avril 1820, de rapprocher une aiguille aimantée d'un fil parcouru par un courant galvanique. L'observation de la déviation de l'aiguille n'étonne pas Ørsted, tant il est habité par la conviction profonde de l'unité entre phénomènes physiques. En juillet 1820, il publie sa découverte dans un Mémoire intitulé « Expériences sur l'effet du conflit électrique sur l'aiguille aimantée », qui fait rapidement le tour de l'Europe.

En septembre 1820, le compte rendu des travaux d'Ørsted présenté par François Arago (1786-1853) à l'Académie des sciences de Paris soulève incrédulité et scepticisme, car l'expérience d'Ørsted présente plusieurs difficultés conceptuelles : en l'absence de notion de courant, comment comprendre que la pile sans le fil n'ait aucun effet sur la boussole ? Comment imaginer une action du circuit sur l'aiguille non pas longitudinale, comme prévu dans la vision newtonienne, mais transversale ? Enfin, comment accepter cette preuve manifeste d'interaction entre électricité et magnétisme, alors que la théorie newtonienne affirme leur indépendance totale ? Pour convaincre la communauté, Arago se voit contraint de reproduire l'expérience d'Ørsted à l'Académie. La communauté reste sans voix, et chacun de reproduire chez lui l'expérience d'Ørsted. Seuls Jean-Baptiste Biot (1774-1862) et André-Marie Ampère (1775-1836) tentent d'en rendre compte par des lois mathématiques. Ils produisent alors deux théories concurrentes. Fervent défenseur de la théorie newtonienne, Biot pose l'hypothèse d'une aimantation temporaire du fil électrique : il ramène ainsi l'inconnu que sont alors les courants galvaniques, au connu que sont les fluides magnétiques, et réduit de fait la découverte d'Ørsted au seul magnétisme. Cette hypothèse newtonienne, qui permet de sauver le principe de l'interaction entre entités de même nature, est retenue par la majorité des physiciens (Poisson, Laplace, etc.). Ampère propose quant à lui une approche très personnelle : il imagine des courants électriques internes dans les aimants, responsables de

leurs propriétés magnétiques, et il émet l'hypothèse totalement nouvelle de l'existence d'une action entre courants électriques. Mais, quel est cet homme à l'intuition si audacieuse ?

André-Marie Ampère (1775-1836)

Pendant sa jeunesse dans la maison familiale de Poleyieux-au-Mont d'Or, André-Marie Ampère se forme seul par la lecture dans la bibliothèque extrêmement fournie de son père. Ce parcours atypique d'autodidacte engendre chez lui une démarche encyclopédique qu'il mène avec passion et sans discipline. Elle fera de lui un scientifique éclectique, mathématicien par statut, chimiste par goût, physicien par période, anatomiste par plaisir et philosophe par passion.

Son œuvre philosophique est le fil directeur de toute son activité intellectuelle. Dès 1803, il commence un mémoire de psychologie analytique portant sur la question posée par l'Institut sur la « décomposition de la faculté de penser ». Cette question le poursuivra pendant toute sa vie, et il essaiera de construire une doctrine de la connaissance en se plaçant au carrefour de diverses influences issues de ses lectures : celle du rationalisme de Descartes et de Leibniz, celle de l'empirisme de Locke, celle du courant encyclopédiste des Lumières, celle de la « science des idées » des Idéologues, celle aussi de la critique de Kant, celle enfin du volontarisme de Maine de

Biran. D'ailleurs, une amitié profonde le lie à ce philosophe, dont il partage l'intuition. Tous deux débattent du pouvoir ontologique de la raison, Ampère étant persuadé qu'elle donne l'accès à une connaissance objective, contrairement à Maine de Biran persuadé de la suprématie de l'analyse intérieure. L'enjeu pour Ampère est de déterminer le seuil à partir duquel la connaissance n'est plus le fait de la seule subjectivité, mais peut atteindre aussi l'ordre réel. La foi religieuse qui l'anime contribue à sa conviction.

Traumatisé par le décès de son père guillotiné pendant la Révolution française, puis par le décès de son épouse malade, Ampère vit à Lyon jusqu'à 29 ans entouré d'amis fidèles. Ensemble, ils partagent mysticisme religieux et thèses de la *Naturphilosophie*. Dès 1801, Ampère développe une pensée scientifique propre : il prend ses distances avec la vision newtonienne et écrit les préliminaires d'un grand mémoire sur la physique, visant à unifier électricité et magnétisme. Il s'écarte alors de la théorie de Coulomb sur l'électricité et le magnétisme car il s'oppose à l'existence des nombreuses forces d'interaction entre fluides, et il refuse « la supposition même d'une action à distance entre deux corps qui ne se touchent pas ». Il imagine un système reposant sur une attraction « unique, universelle, constante » puisque d'origine divine, et une propagation de proche en proche des influences électriques selon les lois de la mécanique par

l'intermédiaire d'un fluide remplissant tout l'espace, encore appelé « éther ». De fait, Ampère a l'ambition de refonder la physique avec un « immense désir de synthèse et d'universelle harmonie », ce qui le conduira même plus tard à rechercher l'unité et le fondement de l'ensemble des connaissances humaines.

L'expérience d'Ersted engendre un bouleversement dans la vie d'Ampère, à l'origine de deux périodes très fécondes. Elle lui permet de redonner vie à son rêve de jeunesse d'unification de l'électricité et du magnétisme, avec le secret espoir d'être le « génie capable d'y appliquer le calcul qui a produit tant de merveilles entre les mains des mathématiciens modernes ».

Septembre 1820 à janvier 1821

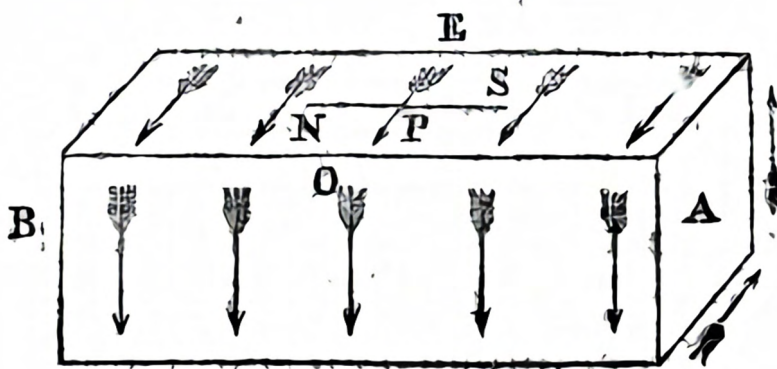
Suite aux interventions d'Arago des 4 et 11 septembre, Ampère entre dans une période de création intense et passionnée dans le but de justifier son intuition par l'expérience, et d'écrire une nouvelle théorie du magnétisme basée sur les actions entre courants.

Séance du 18 septembre 1820 à l'Académie

Après deux semaines de travail ardu, Ampère intervient à l'Académie. Il décompose avec méthode l'action subie par l'aiguille en deux composantes : la première est l'effet de la rotation qui met en croix le fil et l'aimant ; la seconde est l'attraction exercée par le fil sur l'aiguille. Son objectif est de montrer indépendamment ces deux actions d'un conducteur sur un aimant.

Pour montrer que la rotation est bien due à l'action de courants galvaniques, il invente des dispositifs astatiques qui permettent d'éliminer toute action du magnétisme terrestre (fig. 1, p. 31).

Par pure logique scientifique, il cherche ensuite à expliquer de la même façon l'orientation de l'aiguille aimantée isolée dans la direction du pôle Nord de la Terre. Il suppose alors que « 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, recevrait ce courant dans la direction de ses pieds à sa tête, et d'en conclure



3. Croquis d'un aimant selon Ampère. Les flèches représentent le sens des courants internes à l'origine des pôles Nord et Sud de l'aimant. (Ouvrage d'A.-M. Ampère et J. Babinet).

qu'il a lieu, de l'Est vers l'Ouest, dans une direction perpendiculaire au méridien terrestre ». Et il illustre son propos par un petit croquis devenu célèbre (fig. 2).

Par pure logique scientifique encore, Ampère affirme ensuite que les effets directeurs d'un aimant sur l'aiguille aimantée doivent avoir même origine que ceux de la Terre sur cette aiguille : un aimant ne serait donc qu'un assemblage de courants galvaniques dans des plans perpendiculaires à son axe (fig. 3).

Pour montrer l'effet d'attraction exercé par le fil sur l'aiguille aimantée, Ampère construit des spirales de courant, les approche de l'aiguille astatique et observe un effet d'attraction. Comme l'aimant, une spirale de courant exerce donc un pouvoir d'attraction sur l'aiguille, ce qui confirme son hypothèse sur l'origine du magnétisme de la Terre et de l'aimant.

Séance du 25 septembre 1820 à l'Académie

Cette « séance historique » est l'occasion pour Ampère d'apporter les preuves de sa « grande théorie ». Pour cela, il conçoit un dispositif expérimental dans lequel il positionne d'abord un aimant face à une spirale, puis deux spirales face à face (fig. 4) : les phénomènes d'attraction et de répulsion observés en fonction des sens de l'aimant et du courant dans la ou les spirale(s) montrent que la spirale de courant se comporte comme l'image électrique d'un pôle magnétique. Les aimants doivent donc « leurs propriétés à des courants électriques dans des plans perpendiculaires à leur axe ». C'est cette « expérience décisive » qui apporte à Ampère la « preuve définitive » de sa « grande théorie ». Il remplace ensuite les spirales par des hélices pour lesquelles

il invente un terme nouveau, celui de « solénoïde » (du grec « solen » = « tuyau ») et observe que « les spirales et hélices galvaniques produisent les mêmes effets que les aimants ».

Le soir du 25 septembre, il écrit une lettre exaltée à son fils Jean-Jacques, dans laquelle il parle de sa « grande théorie » comme de quelque chose « qui ne ressemble à rien de ce que l'on sait jusqu'à présent ».

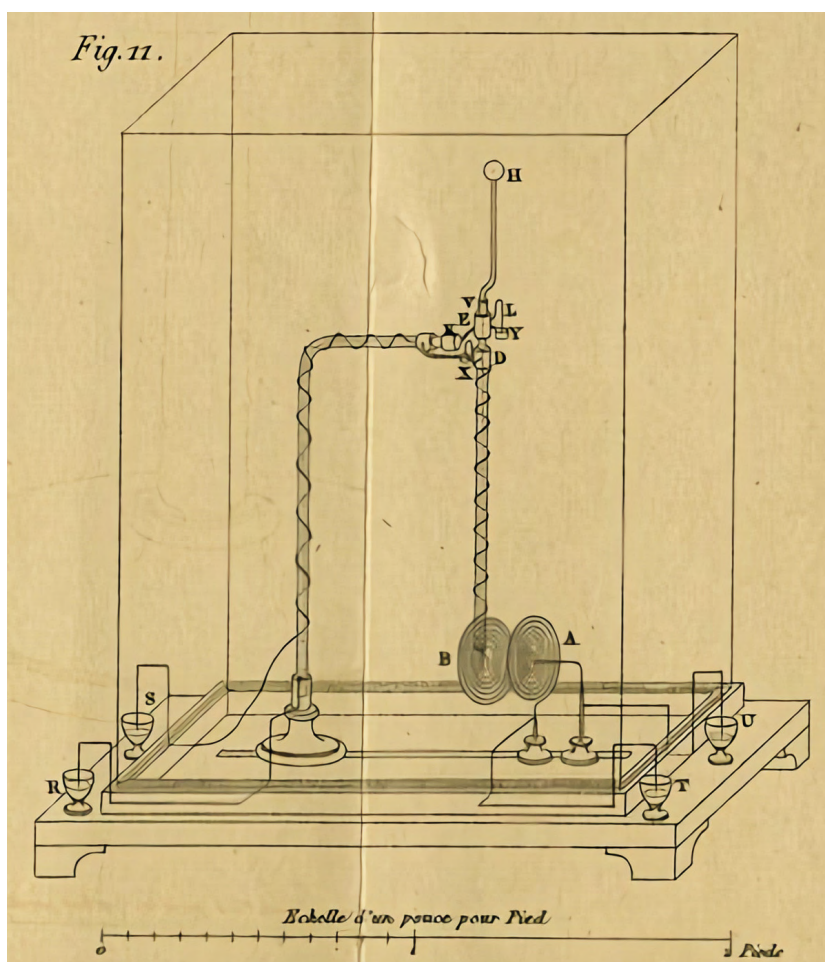
Séance du 2 octobre 1820 à l'Académie

Ampère présente un nouveau dispositif expérimental constitué de deux conducteurs rectilignes et parallèles AB et CD, le premier fixe contrairement au second mobile. CD est relié à la tige isolante EF reposant en X et Y grâce à de fines pointes posées dans de petits godets remplis de mercure, et permettant le passage du courant dans le cadre XCDY, quelle que soit son inclinaison (fig. 5). Ce dispositif permet à Ampère de montrer qu'existent les mêmes effets entre deux courants rectilignes qu'entre deux courants en spirale. Deux fils conducteurs rectilignes parallèles s'attirent ou se repoussent selon le sens du courant qui les parcourt, comme le feraient deux aimants.

Ampère ramène ainsi tous les phénomènes magnétiques à des effets purement électriques, et définit l'« électrodynamique » par opposition à l'électrostatique. Contrairement à Biot qui suppose l'aimantation temporaire du fil, c'est-à-dire le même type d'interactions entre particules, qu'elles soient immobiles ou en mouvement, le génie visionnaire d'Ampère est ici de supposer des interactions de natures différentes entre particules selon leur état, au repos ou en mouvement.

Les notions de courant électrique, tension et conducteur électriques

Ampère cherche aussi à comprendre ce qu'est le phénomène de conduction. Il reprend l'expérience d'Ørsted, d'une part éloigne les pôles de la pile par un fil long de 20 m et d'autre part place une seconde aiguille aimantée sur la pile. Il montre ainsi que la pile et le conducteur qui en relie les pôles ont la propriété commune d'être traversés par un flux électrique identique qualitativement et quantitativement :



4. Dispositif conçu par Ampère pour étudier l'interaction entre deux spirales de fil conducteur, l'une notée A étant fixe, l'autre notée B mobile. Elles s'attirent ou se repoussent selon le sens du courant qui les parcourt, comme le feraient deux aimants [4, 5].

il définit alors la notion de « courant électrique » en tant que circulation à travers l'ensemble fermé pile-conducteur, et une nouvelle grandeur propre au circuit, celle d'« intensité du courant », dont il choisit arbitrairement le sens positif à partir de l'électrolyse de l'eau. Il développe alors un nouvel instrument pour la mesurer, le galvanoscope. Enfin, il définit la « tension électrique » comme le phénomène qui « s'observe lorsque les corps entre lesquels l'action électromotrice a lieu, sont séparés l'un de l'autre par des corps non conducteurs. »

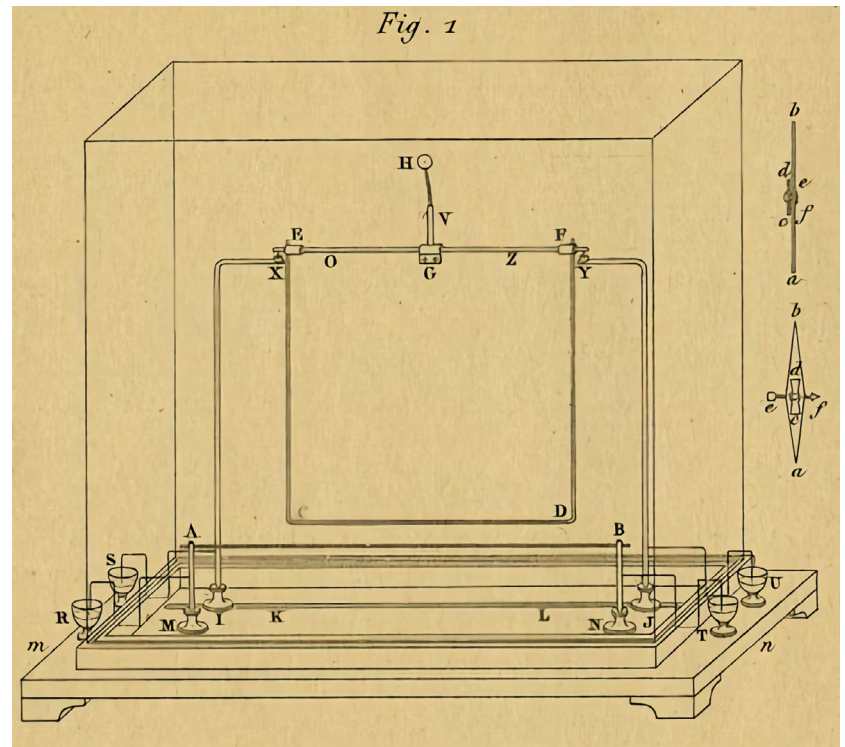
Cette période donne naissance à de nombreux mémoires d'Ampère écrits dans la précipitation à cause de son caractère passionné, mais aussi en réponse à Biot auquel il s'oppose. Les deux physiciens se livrent en effet une compétition féroce, chacun voulant être le premier à prouver la véracité de son hypothèse et à proposer à l'Académie la bonne explication de l'expérience d'Ersted. Ainsi, Ampère produit de nombreux écrits par morceaux séparés, au point même de parfois anticiper les résultats expérimentaux. Ils sont rassemblés dans un mémoire : « De l'action exercée sur un courant électrique par un autre courant, le globe terrestre ou un aimant », qui paraît dans les *Annales de chimie et de physique*.

En 1821, suite à la découverte par Michael Faraday (1791-1867) de la rotation continue d'un aimant sous l'action d'un conducteur, Ampère imagine un nouveau dispositif engendrant des rotations continues uniquement par des courants. Il aurait alors pu découvrir le principe du moteur électrique et de l'induction, mais tel ne fut pas le cas, tant son intérêt portait avant tout sur la compréhension des phénomènes fondamentaux, plutôt que sur le développement de leurs applications.

1820 à 1826 : à la recherche d'une loi universelle

Les hypothèses d'Ampère

Parallèlement à Biot, Ampère cherche à établir une loi mathématique exprimant la force entre courants, ce qui lui permettrait de valider son



5. Dispositif conçu par Ampère pour étudier l'interaction entre deux courants électriques parallèles, l'un AB étant fixe, l'autre CD mobile. Ils s'attirent ou se repoussent selon le sens du courant qui les parcourt, comme le feraient deux aimants [4, 5].

hypothèse. Sa démarche se place dans une pure logique newtonienne : de même que les mécaniciens sont parvenus à déduire mathématiquement tous les mouvements entre deux corps à partir de la force s'exerçant entre deux masses ponctuelles, de même Ampère cherche à écrire une loi générale à partir d'une loi élémentaire universelle entre éléments infinitésimaux de courant, qu'il obtient en décomposant par la pensée un courant fini en une infinité de petits segments élémentaires (fig. 6).

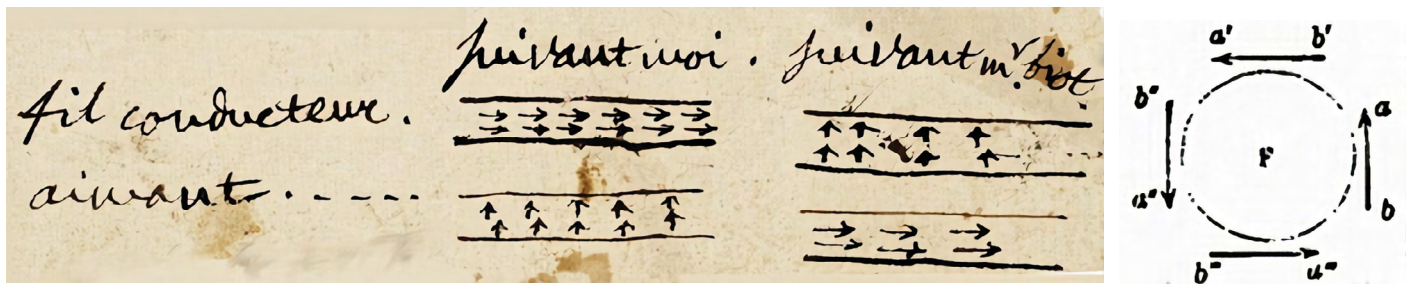
La force entre deux éléments de courant finis peut alors se déduire de cette force élémentaire entre deux éléments infinitésimaux par deux intégrations successives. Un aimant contenant une infinité de courants circulaires coaxiaux selon Ampère, la force entre un aimant et un élément de courant peut, elle, s'obtenir par une triple intégration.

Ampère se place dans le cas le plus général qui soit pour établir cette loi élémentaire universelle. Il imagine deux éléments infinitésimaux de courant séparés d'une distance r , l'un centré en un point A dans un plan P, l'autre centré en B dans un plan Q. L'angle entre les deux plans est γ , et

chacun des éléments de courant fait un angle α pour l'un, β pour l'autre, avec la droite d'intersection entre les deux plans (fig. 7, p. 37). Établir une loi générale d'interaction entre ces deux éléments de courant revient à établir une relation entre toutes ces variables. Ampère se place dans un cadre newtonien et suppose que la force entre ces deux éléments de courant s'exerce à distance selon la droite qui les joint, et qu'elle respecte le principe de l'action et de la réaction. Puis, il émet une hypothèse supplémentaire : il dit que la force élémentaire décroît « dans le rapport inverse du carré de cette distance, conformément à ce qu'on observe pour tous les genres d'action plus ou moins analogues à celui-là ». Il justifiera plus tard cette hypothèse.

La démarche expérimentale

Ampère commence par adopter une démarche expérimentale rigoureuse pour tester les effets de chacune de ces variables indépendamment. Il reprend les expériences menées avec le dispositif de la figure 5, et suppose le résultat obtenu entre deux courants rectilignes et parallèles encore valable entre éléments infinitésimaux. Puis, il



6. Croquis d'un fil conducteur, d'après Ampère et Biot. (a) Schéma d'Ampère. Les flèches représentent des courants élémentaires pour Ampère (colonne « suivant moi ») et des aimants élémentaires pour Biot (colonne « suivant M. Biot »). (b) Tranche de fil conducteur, équivalente à des aiguilles aimantées tangentielles ab , $a'b'$, etc., selon Biot. (Source : www.ampere.cnrs.fr/)

remplace l'un des fils rectilignes par un fil sinueux, et obtient ainsi le principe d'addition vectorielle entre segments de courant, qu'il suppose lui aussi encore valable entre éléments infinitésimaux. Il conçoit ensuite un dispositif très complexe pour étudier séparément les influences de la distance r et des angles α , β , et γ entre éléments de courant. Mais aucune trace de mesure n'existe dans ses manuscrits. Trop complexe à réaliser, ce dispositif n'a sûrement jamais existé. Soulignons un fait marquant chez Ampère, une ingéniosité extra-

ordinaire à concevoir des dispositifs incroyables, et en même temps une absence quasi totale de mesures. Ampère construit sa réflexion en imaginant les résultats de ses expériences.

Face aux difficultés expérimentales rencontrées, Ampère est finalement convaincu de l'impossibilité de mesurer des forces entre des éléments infinitésimaux de courant. Il ajoute alors une hypothèse supplémentaire à ses calculs, en supposant nulle la force entre deux éléments si l'un d'eux est situé dans le plan perpendiculaire au second en son milieu.

La méthode du zéro

Ampère abandonne tout projet de mesures absolues au profit du développement de la « méthode du zéro », qui consiste à calculer le maintien en équilibre d'un conducteur mobile sous l'effet d'actions égales et opposées de deux conducteurs fixes parcourus par un même courant. Il imagine alors des dispositifs complètement astatiques, afin d'éliminer les effets dus au magnétisme terrestre, et étudie donc des situations très pures d'équilibre. L'analyse de la géométrie des conducteurs lui fournit les informations mathématiques nécessaires à la formulation de la force élémentaire entre éléments infinitésimaux de courant. Il reprend alors à nouveau le dispositif de la figure 5 et le modifie pour pouvoir étudier l'équilibre du segment CD solidaire d'un dispositif astatique, et il distingue deux situations différentes en plaçant CD d'abord entre deux fils rectilignes, puis entre un fil rectiligne et un fil sinueux (fig. 8). L'équilibre étudié est celui du segment mobile CD soumis aux actions simultanées exercées par les courants établis entre A et B d'une part, G et H d'autre part.

L'énoncé de la loi fondamentale

Ampère complète l'étude de ces deux cas réels d'équilibre par celle de deux cas théoriques, car issus de dispositifs qui n'ont jamais existé. Ces quatre situations d'équilibre jouent un rôle fondamental dans sa démarche, analogue à celui des trois lois de Kepler pour Newton dans sa quête de la loi fondamentale de la dynamique. Grâce à leur étude, il montre que l'action mutuelle entre deux éléments de courant i et i' , infiniment petits de longueurs ds et ds' , doit être proportionnelle au rapport :

$$ii' ds ds' (\sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - 1/2 \cos\alpha \cos\beta) / r^2,$$

où les angles α , β et γ sont définis sur la figure 7.

Ampère définit alors l'intensité de courant à partir de la force exercée sur un élément de courant parallèle pris comme référence. À partir de cette formule, il calcule ensuite les interactions entre deux circuits réels, entre deux aimants, ou entre un aimant et un courant, dans n'importe quelle configuration, en résolvant « de simples questions de calcul intégral ». Dans la pratique, ce ne sera pas si simple et Ampère sera obligé de développer de nouveaux outils mathématiques.

Enfin, Ampère et Félix Savary (1797-1841) montrent ensemble que la formule de Biot et Savart entre un fil et un aimant, tout comme celle de Coulomb entre deux aimants, peuvent se déduire de sa formule élémentaire et qu'elles n'en sont que des cas particuliers. Et Ampère d'affirmer en 1823 que « tous les faits non encore expliqués complètement [...] sont des conséquences nécessaires de sa formule ». Cette loi mathématique universelle unifiant électricité et magnétisme est



- 1• C. Blondel, A.-M. Ampère et la création de l'électrodynamique, 1820-1827, Bibliothèque nationale, collection Mémoires de la section des sciences (1982).
- 2• C. Blondel et B. Wolf, www.ampere.cnrs.fr/.
- 3• C. Blondel, « Ampère, le "Newton de l'électricité" », *Bulletin de la Sabix* 37 (2004) 56-64.
- 4• *Collection de mémoires relatifs à la physique, t. 2, Mémoires sur l'électrodynamique, première partie*, Société Française de Physique (Ed.), Gauthier-Villars (1885).
- 5• *Collection de mémoires relatifs à la physique, t. 3, Mémoires sur l'électrodynamique, seconde partie*, Société Française de Physique (Ed.), Gauthier-Villars (1887).
- 6• X. Dufour, « Ampère philosophe », *Bulletin de la Sabix* 37 (2004) 65-74.
- 7• A. Kastler, « Ampère et les lois de l'électrodynamique », *Revue d'histoire des sciences* 30-2 (1977) 143-157.
8. L. Julien, « Le système international d'unités redéfini », *Reflets de la physique* 62 (2019) 12-16.

publiée en 1826 dans le mémoire *Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience*.

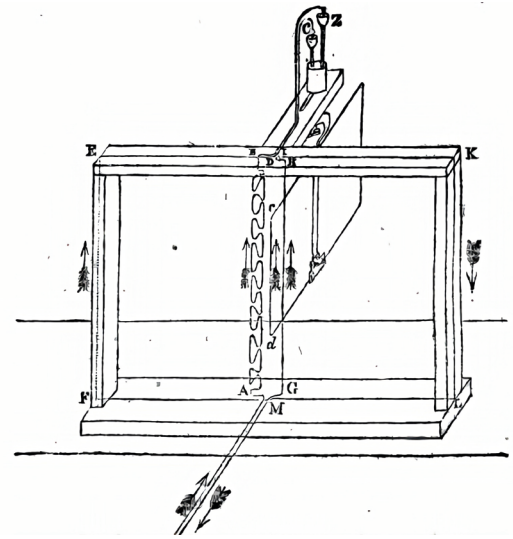
Cette loi donnera plus tard naissance à la loi dite de Laplace, après le développement du calcul vectoriel par le mathématicien allemand Hermann Grassmann (1809-1877) au milieu du XIX^e siècle, puis l'introduction de la notion de champ magnétique avec James Clerk Maxwell (1831-1879).

Ampère s'intéresse ensuite entre autres à l'action mutuelle de deux conducteurs rectilignes parallèles séparés d'une distance a , parcourus par des courants d'intensité I et I' . Il montre que la force exercée par l'un d'eux considéré comme infiniment long, sur une portion de l'autre de longueur L , est proportionnelle à $I'I/a$. L'unité d'intensité, à laquelle a été donnée en 1881 le nom d'Ampère, est définie à partir de l'expression de cette force entre deux courants parallèles dans le système international d'unités en vigueur entre 1948 et 2018 [8].

Enfin, lors d'un cours au Collège de France en 1826, Ampère calcule le travail de la force subie par un pôle magnétique en rotation le long d'une courbe fermée : il obtient une valeur qui croît à chaque tour, et y voit une « curiosité... parce qu'on ne peut isoler les pôles d'un aimant ». En 1856, Maxwell montre que le travail de la force électromagnétique agissant sur le pôle d'un aimant en rotation autour d'un fil est proportionnel à l'intensité du courant dans le fil. Il donne le nom de théorème d'Ampère à la forme générale qu'il obtient ensuite.

La démarche scientifique d'Ampère, tirailé par ses propres contradictions

Le cheminement décrit rend compte de la logique intuitive d'Ampère, qui est le fait d'une succession d'hypothèses et de vérifications, suivies d'une formulation mathématique. Ampère replace ainsi les hypothèses au cœur de son processus de réflexion : il s'appuie sur le fait primitif qui appartient à la réalité matérielle, et l'exprime par une loi mathématique générale qui rend compte de « la théorie des relations ». D'où le titre prudent de son Mémoire de 1826, accompagné de la précision « uniquement déduite de l'expérience ». Mais Ampère cherche à étendre le fait primitif de l'interaction entre courants à l'ensemble des interactions électromagnétiques. Se pose alors la question des propriétés de l'aimant et des limites de son hypothèse première de courants galvaniques circulant tout autour de l'aimant. Il s'enrichit là de ses échanges avec Fresnel et se laisse convaincre par son hypothèse de courants microscopiques autour de particules métalliques situées à l'intérieur de l'aimant pour justifier du magnétisme de celui-ci (voir pp. 41-42). Mais l'hypothèse de la réalité physique de ces courants lui pose problème. Et pourtant, sans elle il ne peut pas justifier l'unité du magnétisme et de l'électrodynamique. S'ensuivent alors de longs développements pour rendre compte de leur réalité, certains utilisant la notion d'éther pour justifier l'interaction électrodynamique par une propagation de proche en proche dans l'éther. En 1834, *l'Essai sur la philosophie des*



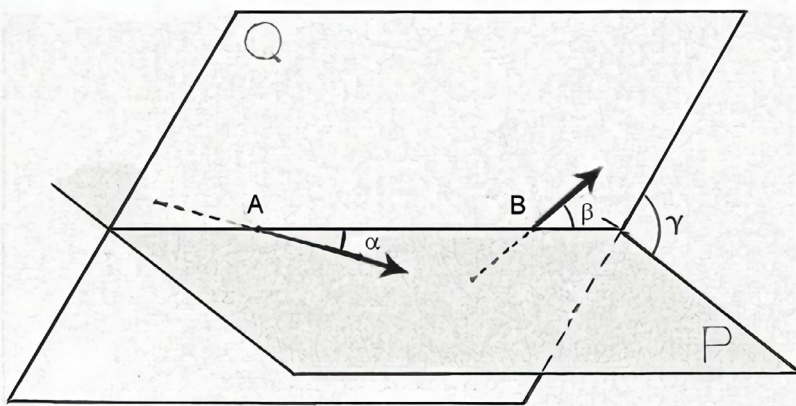
8. L'un des quatre dispositifs conçus par Ampère pour étudier l'équilibre entre conducteurs.

(Source : www.ampere.cnrs.fr/)

sciences expose la dualité de la démarche d'Ampère : la description des phénomènes est obtenue par la loi mathématique définie dans un cadre newtonien d'actions à distance, alors que leur explication est apportée par le réel, la structure physique de la matière, induisant l'hypothèse de l'existence de l'éther. D'où certaines ambiguïtés.

Conclusion

Ce récit d'une période courte et intense de la vie d'Ampère, située entre 1820 et 1826, le fera passer à la postérité en tant que découvreur de l'électrodynamique. Par le bouleversement conceptuel qu'elle induit, l'approche d'Ampère eut l'effet d'une bombe dans la communauté scientifique : d'abord rejetée en bloc, elle fit ensuite consensus grâce à l'acharnement d'Ampère. Les dispositifs expérimentaux qu'Ampère a dessinés ne verront pas tous le jour, mais ils seront des objets de pensée qui lui permettront d'associer expériences qualitatives et formulations théoriques, toujours en quête d'une homogénéité logique entre le « jugement universel » de la théorie et le « jugement particulier » de l'expérience. C'est cette démarche qui permettra à Ampère d'établir une loi unifiant électricité et magnétisme, et qui fera de la découverte d'Ersted une révolution scientifique donnant naissance à l'électromagnétisme. ■



7. Configuration d'Ampère pour l'étude générale de l'interaction entre deux éléments infinitésimaux de courant, l'un centré en A, l'autre en B. (www.ampere.cnrs.fr/)