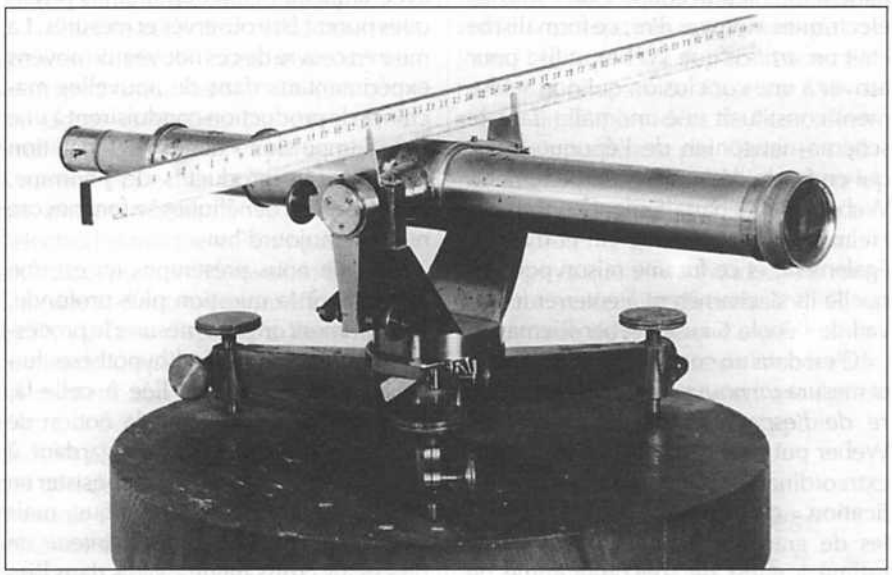
La portée scientifique de la correspondance de 1845 entre Gauss et Weber

Dans les années 1830, les expériences que conduisirent Carl Friedrich Gauss et Wilhelm Weber pour vérifier la théorie d'Ampère sur l'électrodynamique, aboutirent à l'hypothèse de l'électron et du noyau atomique plus de cinquante ans avant sa confirmation empirique.

LAURENCE HECHT

La lettre que Carl Friedrich Gauss envoya le 19 mars 1845 à son jeune collaborateur, Wilhelm Weber, représente l'une des plus remarquables interventions d'un individu pour changer le cours de l'histoire. La science moderne de l'atome, la physique, la chimie et tout ce qui en dépend, n'auraient jamais existé sans cela. Ainsi, le fait que l'objet de cette lettre ne soit connu que d'un nombre restreint de spécialistes et que, même parmi ces derniers, aucun ne comprenne de manière adéquate son sens profond, nous indique que ce qu'on nous présente comme de la science dans les universités relève plutôt de la *publicité mensongère*.

Ce qui nous intéresse dans cette correspondance, c'est l'existence d'une forme particulière de concept scientifique — connue depuis Platon sous le nom d'*idée* — qui fut introduite en électrodynamique par André-Marie Ampère quelque vingt ans auparavant. A cette époque, aucun scientifique à part Gauss n'avait reconnu l'importance de cet aspect du travail d'Ampère. Dans sa lettre de 1845, Gauss traita précisément de cette question et réorienta de manière fructueuse l'approche de Weber. Grâce à cela, Weber développa une généralisation de la loi d'Ampère qui conduisit dès 1870 à la théorie de l'existence du noyau atomique chargé électriquement, autour duquel gravitent des électrons de charge opposée, et ceci, des décennies avant toute vérification empirique de ce phénomène. A la même époque, Weber établit la formule précise (e^2/mc^2) de mesure atomique, appelée plus tard *rayon de l'électron classique*, et découvrit la force de liaison nucléaire, un phénomène pour lequel il n'y eut aucune preuve empirique avant le XXème siècle.



Ce télescope muni d'une règle graduée est similaire à l'instrument conçu par Gauss en 1832 afin de déterminer précisément la déflexion angulaire.

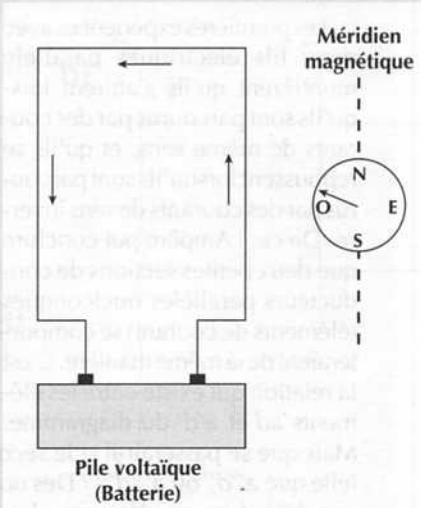
Le fait que ces découvertes de Weber soient quasiment inconnues aujourd'hui est en soi un scandale, bien que ce ne soit pas notre principal sujet ici. Nous nous concentrerons plutôt sur un aspect sous-jacent essentiel : la méthode d'Ampère, de Gauss et de Weber ; c'est-à-dire, la véritable méthode scientifique qui seule conduit à la découverte fondamentale. La correspondance de 1845 nous fournit de précieuses indications sur ce processus.

Commençons par le contexte général : Hans Christian Œrsted fut le premier à démontrer, en 1820, l'effet d'un courant électrique sur un aimant (**Figure 1**). Biot, Savart et d'autres de l'*establishment* de la physique en France soutenus par Laplace, entreprirent des recherches empiriques pour déterminer l'effet mesurable d'un courant dans un fil conducteur sur un aimant. Ampère, réalisant que ce courant électrique (galvanique) représentait un phénomène complètement nouveau, vit dans la démonstration d'Œrsted la possibilité de fai-

re une avancée fondamentale dans la connaissance sur le magnétisme et sur la constitution atomique de la matière. Partant de l'hypothèse que le magnétisme résulte de courants électriques entourant les molécules de matière, il se proposa d'abord de déterminer si deux conducteurs électriques s'influencent réciproquement de la même manière qu'un simple conducteur influence un aimant. Ses premières expériences établirent que deux conducteurs parallèles s'attirent ou se repoussent suivant que les courants qui les traversent sont ou non dans le même sens. Il montra ensuite qu'un courant qui passe dans un fil enroulé hélicoïdalement, configuration à laquelle il donna le nom de solénoïde, crée un pôle nord et un pôle sud magnétiques comme ceux que l'on trouve dans une barre aimantée (**Figure 2**).

Ayant ainsi découvert en l'espace de quelques semaines les premières lois empiriques d'une nouvelle science — *l'électrodynamique*, Ampère s'assigna la tâche d'en déterminer les lois fondamentales. Il proposa ainsi de trouver une formule exprimant l'interaction entre deux portions de courant très courtes — qu'il appela *éléments de courant* — circulant dans deux fils conducteurs électriques adjacents. Ses résultats furent remarquables. A l'époque, il était établi que les lois de la gravitation, de l'électrostatique et du magnétisme étaient dépendantes de l'inverse du carré de la distance entre leurs éléments respectifs (masse, charge et *molécules magnétiques*). Cependant, les lois d'Ampère de la force sur les éléments de courant mettaient en évidence non seulement une dépendance en fonction de leur distance, mais aussi de leurs orientations dans l'espace.

Figure 1 - L'expérience d'Œrsted



Hans Christian Œrsted fut le premier à mettre en évidence une relation entre l'électricité et le magnétisme. Il montra que lorsqu'elle est placée dans le voisinage d'un fil parcouru par un courant électrique, une aiguille de boussole s'oriente vers lui.

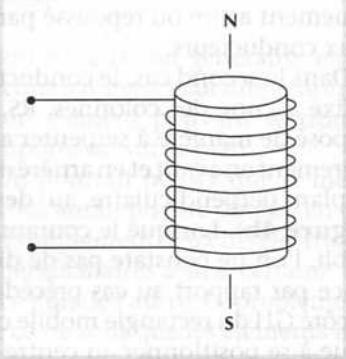
La méthode de l'hypothèse

L'existence d'une telle anomalie, fissurant ainsi l'édifice parfait de l'Unification des forces dressé depuis peu, en perturba plus d'un. Pendant une vingtaine d'années, le travail d'Ampère, pourtant bien connu des scientifiques, ne fut jamais pris au sérieux. Même si beaucoup critiquaient cet état de fait, personne avant Weber ne se préoccupa de le mettre à l'épreuve. Le problème essentiel qui l'empêchait d'être accepté était un parti pris philosophique répandu dans la science d'alors, comme celle d'aujourd'hui, appelé *empirisme*. L'empirisme exige qu'aucun phénomène physique ne puisse être mesuré, et donc ne puisse être soumis à l'analyse mathématique rigoureuse propre aux sciences pures, à moins qu'on puisse le voir, l'entendre, le sentir, le toucher ou le goûter.

La méthode de l'hypothèse mise en œuvre par Ampère suppose plutôt que les soi-disant données sensorielles sont totalement trompeuses. Rien de ce que l'on peut voir, entendre, sentir, toucher ou goûter n'est ce qu'il a l'air d'être. Considérons, par exemple, un objet aussi simple qu'un barreau magnétique. Un empiriste pourrait passer sa journée à mesurer et analyser son effet sur un fil électrique ; il peut le couper en deux, le réduire en poudre, le dissoudre dans un acide, ou le faire fondre dans un four, et cependant ne jamais arriver à la simple *hypothèse* que sa propriété magnétique dérive de l'existence de très petits courants électriques entourant les particules invisibles qui le constituent.

Formuler une telle idée n'est cependant que la première petite étape du travail de la méthode de l'hypothèse. Il faut avoir une croyance passionnée — dans un sens proche de la véritable signification du mot *foi* — en la réalité d'une simple idée de ce

Figure 2 - Le solénoïde d'Ampère



Ampère fit l'hypothèse que la véritable cause du magnétisme est le mouvement de courants électriques sur des petites orbites autour de molécules de matière. Pour prouver cela, il construisit le premier électroaimant du monde en enroulant un fil électrique autour d'un cylindre qu'il nomma solénoïde. Lorsque le solénoïde est connecté à une batterie, les extrémités du cylindre deviennent le pôle nord et le pôle sud d'un barreau aimanté. Ampère pensait que le mouvement circulaire du courant à l'échelle du solénoïde, reproduisait l'effet des petites orbites circulaires qu'il concevait à l'intérieur d'un aimant.

genre. Ce n'est que si elle est guidée par une telle passion, par *un amour de l'idée*, qu'une personne peut trouver la motivation nécessaire pour la pousser davantage, comme Ampère le fit pendant cinq ans de recherche expérimentale et d'analyse mathématique avant qu'il ne soit sûr de son fait. Et si *l'idée* est d'un type fondamental, comme l'était le concept d'Ampère de l'action électrique, elle tendra à jeter à bas les conceptions existant auparavant. Ainsi, l'existence d'une force dépendant de relations angulaires défiait réellement les conceptions newtoniennes. Les lois de la physique ne l'auraient pas autorisée — et pourtant, elle existait[1].

Gauss était l'un des rares — sinon le seul — qui appréciait les résultats d'Ampère à leur juste valeur. Sa lettre du 19 mars 1845 met l'accent sur un aspect de l'hypothèse d'Ampère, qui est une idée connue sous le nom de *force longitudinale*. C'est une simple construction ne reposant que sur des relations géométriques élémentaires, mais tellement controversée que certains en ont nié l'existence pendant près de deux siècles. Pour comprendre à quel point elle est cruciale pour la suite de l'histoire, donnons un résumé sur la manière dont Ampère la développa.

1. LES ÉLÉMENTS DE LA LOI D'AMPÈRE

Considérons d'abord deux éléments de courant *ad* et *a'd'*, parallèles entre eux et perpendiculaires à une ligne joignant leurs points milieu (**Figure 3**). Ampère savait d'après ses premières expériences qu'ils vont s'attirer ou se repousser suivant que le sens des courants qui traversent les fils dont ils font partie sont identiques ou opposés. Mais qu'en sera t-il pour des éléments dans d'autres positions telles que *a''d''* ou *a'''d'''* ? Désignons par la constante *k*, le rapport de la force entre deux éléments longitudinaux, à la force entre deux éléments parallèles. Quelle est sa valeur ? Deux éléments de courants ne peuvent être isolés des circuits dont ils font partie, pour être mis dans ces positions. Il est donc par conséquent impossible d'effectuer une mesure empirique directe des forces qu'ils exercent l'un sur l'autre. La méthode de l'hypothèse est la seule qui puisse nous donner la solution. Voici comment Ampère procéda dans ce qui est connu sous le nom de « seconde expérience d'équilibre ».

Deux colonnes parallèles et verticales sont placées sur la table d'un laboratoire à une faible distance l'une de l'autre. L'on dispose entre elles un circuit rectangulaire de telle sorte que l'un des cotés du rectangle soit parallèle aux deux colonnes et dans leur plan. Le rectangle est libre d'effectuer une rotation selon un axe vertical (**Figure 4**). Dans le premier cas, deux conducteurs électriques rectilignes sont fixés chacun sur une colonne et sont parcourus par des courants électriques de même sens, soit du haut vers le bas, soit du bas vers le haut. Un courant de sens opposé passe par le côté GH du rectangle parallèle aux deux conducteurs. Au moment où le courant s'établit, Ampère constate que le rectangle reste positionné au centre des deux colonnes, étant identiquement attiré ou repoussé par les deux conducteurs.

Dans le second cas, le conducteur *kl* fixé à l'une des colonnes, RS, est disposé de manière à serpenter arbitrairement en avant et en arrière dans le plan perpendiculaire au dessin (**Figure 4b**). Lorsque le courant est établi, l'on ne constate pas de différence par rapport au cas précédent. Le côté GH du rectangle mobile continue à se positionner au centre des deux colonnes, et continue à le faire même si l'on change la forme du tortillon *kl*.

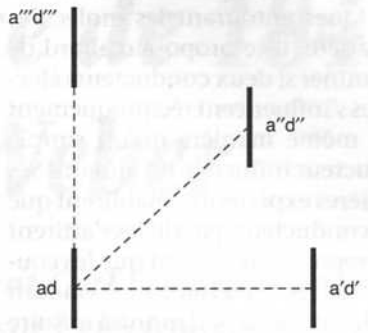
Pour expliquer ce paradoxe, Ampère analyse le courant dans le fil ondulé en le décomposant en éléments horizontaux et verticaux. Les deux fils ondulé et rectiligne parcourent la même longueur verticale ; de ce fait, la somme des composantes verticales de *kl* est la même que celle de *bc*. Comme le premier cas prouve que les fils verticaux ne provoquent aucun mouvement, les composantes verticales de *kl* peuvent donc être ignorées. Le problème se ramène donc à l'examen des composantes horizontales.

Considérons n'importe quelle composante, par exemple celle qui se trouve à l'emplacement arbitraire *p* sur la Figure 4b, qui est par définition perpendiculaire à la zone ombrée RScb. Considérons-le par rapport à n'importe quel élément de courant du fil mobile GH. En vertu du fait que GH ne bouge pas, nous pouvons conclure que la composante horizontale arbitrairement choisie ne doit avoir aucune interaction avec aucun élément de courant le long de GH. Si elle avait une quelconque interaction, un déséquilibre des forces surviendrait du fait que le fil est tordu de manière arbitraire, ce qui provoquerait une rotation de GH.

De ce fait déduit expérimentalement, Ampère fut en mesure d'énoncer le théorème suivant sur l'interaction des éléments de courant :

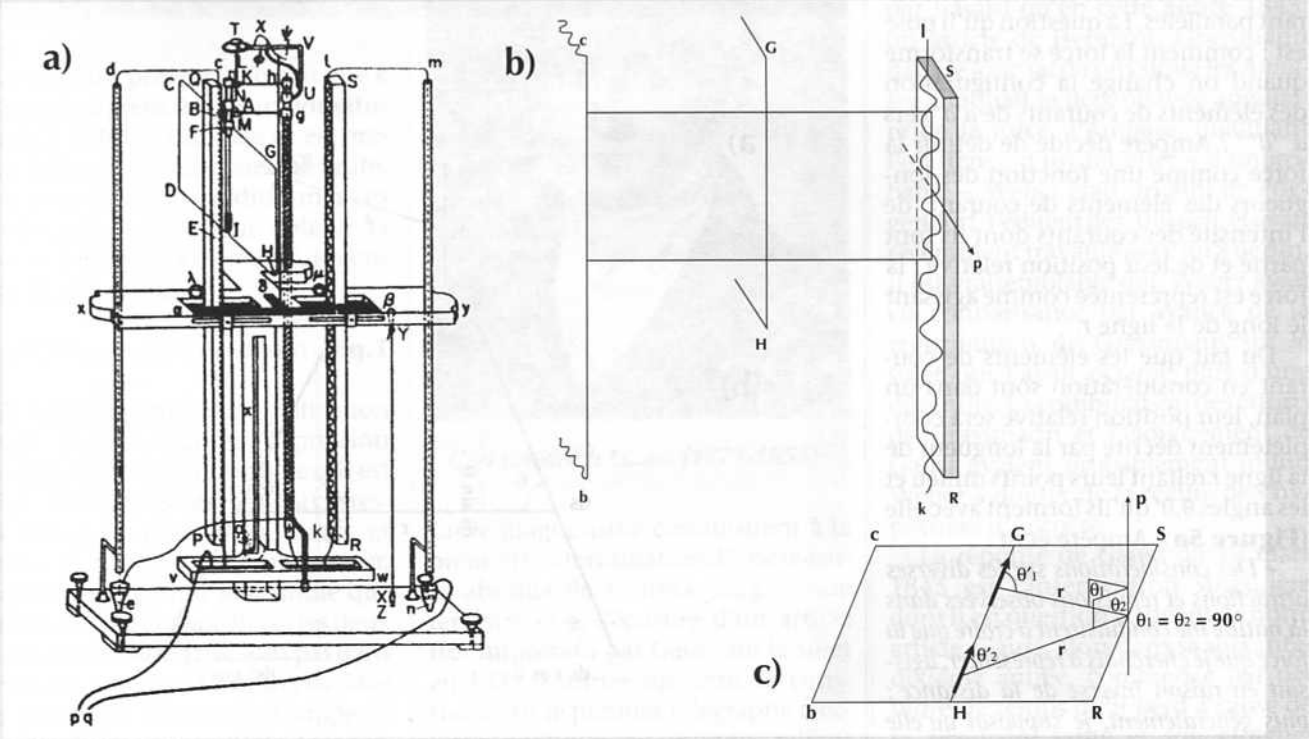
« (...) qu'une portion infiniment petite d'un élément de courant n'exerce aucune action sur un autre élément de courant infiniment petit situé dans un plan qui passe par son point milieu et qui est

Figure 3 - La force entre éléments de courants



Les premières expériences avec deux fils électriques parallèle montrèrent qu'ils s'attirent lorsqu'ils sont parcourus par des courants de même sens, et qu'ils se repoussent lorsqu'ils sont parcourus par des courants de sens inverse. De ceci Ampère put conclure que deux petites sections de conducteurs parallèles quelconques (éléments de courant) se comporteraient de la même manière. C'est la relation qui existe entre les éléments *ad* et *a'd'* du diagramme. Mais que se passerait-il si le second élément était dans une autre position, telle que *a''d''* ou *a'''d'''* ? Des observations directes ne permettaient pas de conclure dans ces deux cas plus généraux.

Figure 4 - La seconde expérience d'équilibre d'Ampère



La plus importante loi d'Ampère d'interaction entre éléments de courant peut être déduite de sa seconde expérience d'équilibre. En (a) se trouve une représentation de l'appareil qu'Ampère utilisa pour son *Mémoire* de 1826. Les deux baguettes en bois PQ et RS sont placées de manière à être face à face. Un fil électrique rectiligne court le long de PQ, tandis que le sur la baguette RS serpente en avant et en arrière dans un plan perpendiculaire à PQRS. Le fil rectangulaire CDGH conduit également le courant et peut tourner autour de son axe MI.

L'objet de cette expérience est de montrer si le serpentin de RS peut provoquer une rotation du cadre CDGH. Le circuit est disposé de telle manière que le courant circule vers le haut dans les deux conducteurs fixes en PQ et RS, et vers le bas dans le côté GH du rectangle mobile. L'ensemble de l'appareil est un circuit unique. Le courant rentre par le récipient de mercure en *v* et en sort par la coupelle de mercure en *n*. Le fil passant le long du tube en verre *fgh* est enroulé hélicoïdalement de manière à annuler son effet magnétique dans la direction latérale. Les colonnes verticales *de* et *mn* sont des tubes en verre pour le circuit retour.

Nous avons en (b) un détail schématique de la relation entre les deux conducteurs fixes et le côté GH du rectangle mobile : *p* est la composante horizontale d'un élément de courant en un point arbitraire du serpentin *kl*. Le rectangle grisé représente le plan RScb auquel *p* est perpendiculaire.

En (c) le rectangle RScb a été tourné de 90° de manière à ce que l'élément de courant *p* apparaisse vertical. Les points milieu de deux éléments de courant arbitraires représentés sur le plan RScb sont reliés par des lignes *r* au point milieu de *p*. L'angle formé par *r* et *p* (θ_1, θ_2) est toujours droit. L'expérience montre que quelque soit l'autre angle (θ'_1, θ'_2), l'élément de courant *p* n'exerce aucune force sur aucun élément de courant du rectangle RScb.

perpendiculaire à sa direction. » [Ampère 1826, p.202]

La **Figure 4c** nous permet de comprendre comment se fait la généralisation. Le plan RScb a été tourné de 90°. La composante horizontale est représentée ici par la flèche *p* passant verticalement à travers le plan. Les deux autres flèches représentent deux éléments de courant arbitraires de GH. Ils peuvent former des angles quelconques avec les lignes *r* qui les relient au point milieu de *p*. Du fait que l'expérience montre que l'élément de courant *p* n'exerce aucune action sur eux, on généralise en disant que *p* n'exerce aucune action sur aucun élément pouvant se trouver n'importe où sur le plan.

On pourrait penser que le même résultat aurait pu être obtenu en plaçant simplement deux fils électriques perpendiculaires à une certaine distance l'un de l'autre. Le problème est que ce ne sont que les éléments infinitésimaux des deux fils, précisément au point de perpendicularité, qui nous concernent, alors que dans cette dernière configuration simplifiée, tous les autres éléments des deux fils contribueraient à l'effet mesuré. L'on voit donc l'idée de génie de la seconde expérience d'équilibre, par laquelle nous pouvons précisément isoler — bien que par abstraction — l'effet que nous voulons mesurer. En fait, ceci est le cas pour les quatre expériences d'équilibre ; il faut que le lecteur sache qu'Ampère a réalisé des douzaines — voire des centaines — d'autres expériences avant de pouvoir réduire sa présentation aux quatre expériences d'équilibre dans son *Mémoire* final de 1826 sur l'électrodynamique.

Le théorème déduit de la seconde

expérience est la clef permettant à Ampère de résoudre le problème posé à la Figure 3. Retournons à celle-ci où *ad* et *a'd'* sont deux éléments de courant parallèles. La question qu'il pose est : comment la force se transforme quand on change la configuration des éléments de courants de *a'd'* vers *a'''d'''* ? Ampère décide de définir la force comme une fonction des longueurs des éléments de courant, de l'intensité des courants dont ils font partie et de leur position relative ; la force est représentée comme agissant le long de la ligne *r*.

Du fait que les éléments de courant en considération sont dans un plan, leur position relative sera complètement décrite par la longueur de la ligne *r* reliant leurs points milieu et les angles θ,θ' qu'ils forment avec elle (**Figure 5a**). Ampère écrit :

« Des considérations sur les diverses attractions et répulsions observées dans la nature me conduisirent à croire que la force que je cherchais à représenter, agissait en raison inverse de la distance ; plus généralement, je supposai qu'elle était inversement proportionnelle au rapport inverse d'une puissance n de cette distance, n étant une constante à déterminer ». [Ampère 1826, p.200]

Si les longueurs infiniment petites des éléments de courant sont représentées par *ds, ds'*, leurs intensités par *i, i'* et si θ,θ' désignent les angles qu'ils forment avec la ligne qui les relie, alors en se basant sur ces suppositions on écrit la force entre eux sous la forme :

$$\frac{ii'\,ds\,.\,ds'}{r^n}\ \phi\ (\theta,\theta')$$

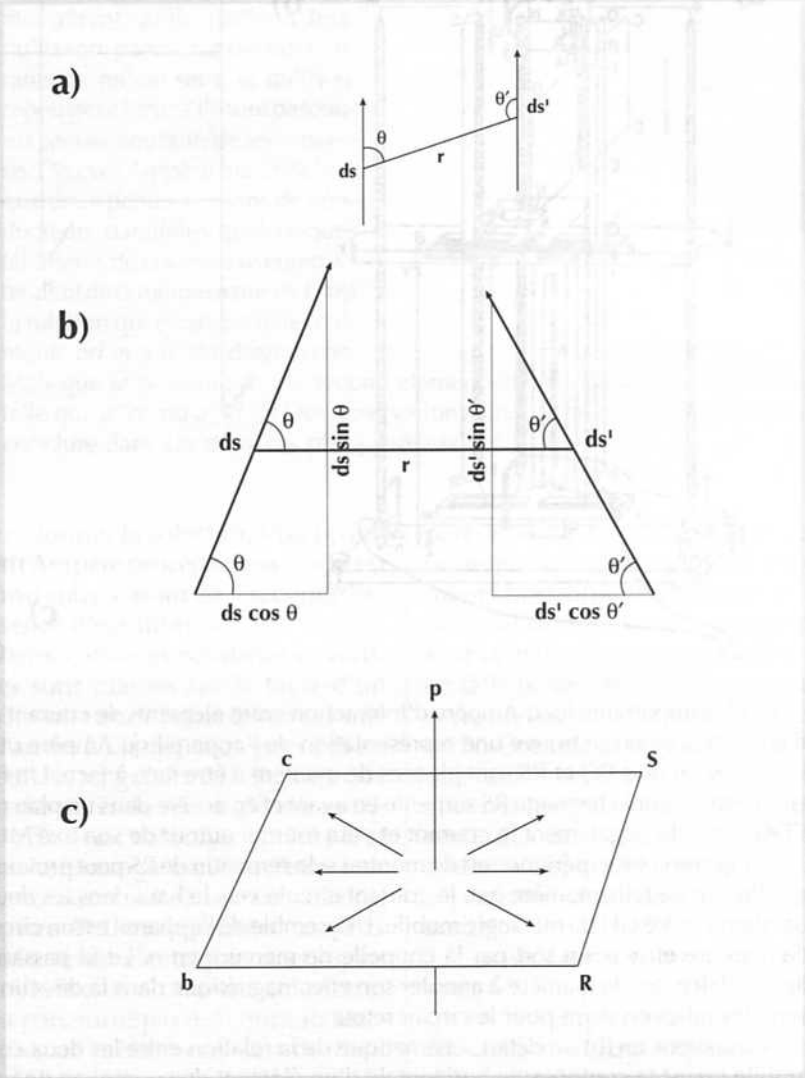
où ϕ représente une fonction inconnue des angles entre les deux éléments de courant.

Ceci nous laisse deux inconnues à déterminer : la valeur de l'exposant *n* et la fonction des angles ϕ. Les résultats de la seconde expérience d'équilibre nous facilitent dans la recherche de ϕ. Prenons deux éléments de courant arbitraires dans le plan *ds, ds'* et décomposons chacun en deux composantes perpendiculaires, comme cela est représenté en **Figure 5b**. Les composantes parallèles seront représentées par *ds.sinθ* et *ds'.sinθ'*, les composantes longitudinales par *ds.cosθ* et *ds'.cosθ'*. D'après le théorème déduit de la seconde expérience d'équilibre, nous voyons que les forces entre *ds.cosθ* et *ds'.sinθ'*, d'une part, et *ds.sinθ* et *ds'.cosθ'*, d'autre part, sont nulles. Cela peut sembler confus à première vue, car les deux éléments perpendiculaires en considération à la **Figure 4** ne sont pas, en général, dans le même plan, mais le théorème déduit de la seconde expérience d'équilibre subsume le cas planaire, comme le lecteur peut le voir sur la **Figure 5c**.

L'action entre deux éléments de courant se ramène donc à deux actions combinées, c'est-à-dire l'interaction entre *ds.sinθ* et *ds'.sinθ'* et celle entre *ds.cosθ* et *ds'.cosθ'* . Il est facile de voir que ces deux paires d'actions ont lieu entre deux composantes qui sont soit *parallèles* soit *longitudinales*.

La première peut être représentée par :

Figure 5 - Déduction de la loi de la force d'Ampère



En (a) deux éléments de courant *ds, ds'* forment des angles θ, θ' avec la ligne *r* qui relie leurs points milieu.

Les composantes horizontale et verticale de deux éléments de courant arbitraires *ds, ds'* sont représentés en (b). Ce sont *ds.sinθ, ds'.sinθ', ds.cosθ, ds'.cosθ'*. Le théorème déduit de la seconde expérience d'équilibre d'Ampère permet l'élimination de deux interactions *(ds.cosθ. ds'.sinθ', ds'.cosθ', ds.sinθ)*.

En (c) sont représentés les éléments de courant dans le plan RScb, qui forment également un plan perpendiculaire à *p*.

$$\frac{ii'\,ds\,.\,ds'\,\sin\theta\,\sin\theta'}{r^n}$$

et la seconde par :

$$\frac{ii'\,ds\,.\,ds'\,k\,\cos\theta\,\cos\theta'}{r^n}$$

en gardant présent à l'esprit que k désigne le rapport de la force longitudinale à la force parallèle et en prenant la force parallèle comme unité. Il ne reste plus qu'à additionner ces deux composantes pour obtenir la force entre les deux éléments de courant, ce qui donne :

$$\frac{ii'\,ds\,.\,ds'}{r^n}(\sin\theta\,\sin\theta' + k\,\cos\theta\,\cos\theta') \quad \textbf{Eq.1}$$

Avec seulement une simplification pour le lecteur, ceci est l'expression générale de la force d'Ampère qui est l'objet de la discussion dans la correspondance de 1845 entre Gauss et Weber. Par souci de simplification, nous n'avons déduit la formule que dans le cas de coplanarité. Si les deux éléments de courant ne sont pas dans le même plan, mais se trouvent dans des plans qui forment un angle ω, alors l'expression complète de la force d'Ampère devient :

$$\frac{ii'\,ds\,.\,ds'}{r^n}(\sin\theta\,\sin\theta'\,\cos\omega + k\,\cos\theta\,\cos\theta')$$

La détermination des valeurs des constantes n et k, requit deux expériences d'équilibre supplémentaires qui permirent à Ampère de donner les valeurs $n = 2$ et $k = -1/2$.

2. LA FORMULE D'AMPÈRE ET LA CORRESPONDANCE DE GAUSS ET WEBER

En 1828, Wilhelm Weber, un jeune diplômé en physique qui s'était distingué par des recherches originales en acoustique et en ondes liquides, fit la connaissance de Carl Friedrich Gauss le plus grand astronome et mathématicien de l'époque en Europe, au cours d'une conférence scientifique à Berlin. Gauss avait besoin d'aide pour réaliser les recherches qu'il avait planifiées sur le magnétisme et l'électricité et Alexandre von Humboldt encouragea leur collaboration. Weber s'était vu décerner un professorat à l'université de Göttingen et commença à y travailler en 1831. Leurs recherches communes

Carl Friedrich Gauss (1777-1855)

sur le magnétisme conduisirent à la première détermination d'une mesure absolue de la force magnétique terrestre et à l'écriture d'un article très important par Gauss sur le sujet en 1832. L'année suivante, ils construisirent le premier télégraphe électromagnétique du monde, reliant l'observatoire de l'université avec le laboratoire de physique. Gauss avait compris que la confirmation de la loi d'Ampère serait l'un des principaux chantiers que la science aurait à entreprendre, et c'est dans cet esprit que Weber lança une longue série d'expériences. Le magnétomètre de Gauss fut transformé en un instrument, l'électrodynamomètre, qui réaliserait des mesures électriques avec une précision que Gauss avait obtenue pour le magnétisme.

En 1845, Weber se trouvait alors à Leipzig et préparait un traité sur ses résultats qu'il espérait présenter à la Société royale de Göttingen. Incertain quant à ses conclusions, il en envoya une copie à Gauss le 18 janvier 1845 lui demandant son avis. Le 1er février 1845, Weber envoya une autre lettre à Gauss lui expliquant un changement qu'il avait effectué dans la formule d'Ampère, *« ce que je justifie en considérant que la définition du coefficient du second terme que j'ai écarté — définition déduite empiriquement — semble peu acceptable, à cause du manque de fiabilité de la méthode utilisée. De ce fait, tant qu'il n'a pas de détermination quantitative plus précise, ce coefficient devrait, avec ce raisonnement, être considéré égal à zéro ».*

Le coefficient auquel Weber faisait allusion était le k dont il a été question ci-dessus. Le second terme $k.\cos\theta.\cos\theta'$, est la force longitudinale d'Ampère que Weber proposait d'abandonner. Ce n'est peut-être pas par hasard qu'en cette année 1845, un article de Hermann Grassmann dans le journal de physique les *Annalen* attaquait la dépendance angulaire de la force d'Ampère, qualifiant l'existence d'un tel effet « d'improbable ». Weber était un ami de Poggendorf, l'éditeur des *Annalen*, et avait récemment travaillé avec lui à Berlin. Il est vraisemblable que Weber avait eu connaissance par avance de la contribution de Grassmann sur le sujet qui l'avait occupé plus d'une décennie. La combinaison des efforts de Grassmann et l'éloignement de Gauss avaient probablement induit Weber à douter de la réalité de l'hypothèse d'Ampère.

La réponse de Gauss du 19 mars 1845 est l'intervention singulière dont il est question au début de notre article. Gauss, alors dans sa soixante-dixième année, commence par déplorer le temps qu'il perd à cause de sa mauvaise santé et son éloignement par rapport au sujet depuis une décennie. Cependant, à propos de la modification de la formule proposée, Gauss écrit avec une acuité intacte :

« (...) Je pense en première approche que si Ampère vivait encore, il protesterait fermement (...). Dans le cas qui nous intéresse ici, la différence est une question vitale pour toute la théorie d'Ampère sur l'interchangeabilité entre le magnétisme et les courants galvaniques, théorie qui dépend absolument de l'exactitude de [cette formule] et qui s'effondre si une autre est adoptée.

(...) Je ne pense pas qu'Ampère, même s'il admettait lui-même l'incomplétude de ses expériences, permettrait l'adoption d'une formule totalement différente, par laquelle toute sa théorie serait mise en pièces, tant que cette autre formule ne serait pas confirmée par des expériences totalement décisives. Vous avez certainement mal compris les réserves qui, selon votre seconde lettre, avaient été formulées par moi. (...) »

Pour comprendre clairement ce que Gauss exprime, le lecteur doit savoir qu'avant Ampère, le magnétisme avait été expliqué par la séparation (polarisation) de deux *fluides magnétiques*, boréal et austral, de particules (*molécules magnétiques*) d'une substance magnétique. Magnétiser un barreau de fer était vu comme polariser et aligner les molécules magnéti-

ques le long d'un axe du barreau. Ampère suggérait que la molécule magnétique soit plutôt une boucle de courant électrique, une *orbite galvano-électrique* comme Gauss caractérisa l'hypothèse d'Ampère dans son étude de 1832 sur le magnétisme. La magnétisation selon Ampère consistait à aligner ces microscopiques boucles de courant le long de l'axe magnétique. Dans son traité de 1826, Ampère avait exprimé mathématiquement l'interdépendance [entre le magnétisme et l'électricité, NdT] de sa nouvelle hypothèse sur le magnétisme dans sa formule sur la force entre deux éléments de courant.

Weber accepta totalement la correction de Gauss et répondit le 31 mars 1845 :

« Il a été d'un très grand intérêt pour moi d'apprendre dans ce que vous avez eu l'amabilité de m'écrire qu'Ampère, dans la définition du coefficient qu'il désigne par k dans sa loi fondamentale, était guidé par d'autres raisons que l'expérience empirique immédiate — coefficient qu'il cite au début de son traité — et que, de ce fait, la formule que j'en avais tirée parce qu'elle me semblait un peu plus simple, est inacceptable car elle n'exprime pas la loi d'Ampère avec exactitude ; cependant, en procédant à ce qui me semble être une légère modification de mon hypothèse, j'ai pu obtenir l'exacte expression de la loi d'Ampère. »

3. LE DÉVELOPPEMENT DE LA LOI DE WEBER

Pendant les dix années précédentes, Weber s'était investi dans une recherche expérimentale afin d'obtenir la confirmation de la loi d'Ampère. L'instrument de mesure qu'il avait développé, *l'électrodynamomètre* consistait en deux électro-aimants hélicoïdaux dont l'un était fixe et l'autre pouvait tourner. Celui qui était mobile et suspendu par deux fils dont la torsion pouvait être mesurée avec précision fut appelé *bobine bifilaire*. Le courant qui traversait les deux bobines était mesuré avec précision ainsi que l'angle de rotation qui était observé grâce à un système développé par Gauss pour son magnétomètre et qui consistait en un miroir et un télescope. L'effet de la force magnétique terrestre pouvait être déterminé et donc éliminé grâce au système déjà réalisé par Gauss. De ce fait, les

Wilhelm Eduard Weber (1804-1891)

données expérimentales purent être corrigées afin de déterminer le moment de rotation exact exercé entre les deux solénoïdes d'Ampère.

Ampère avait déjà montré dans son fameux traité (Ampère, 1826) comment calculer le moment de rotation exercé par une simple boucle de courant circulaire sur un élément de courant se trouvant dans n'importe quelle position. La force était dépendante de l'intensité du courant, de la distance de séparation et de la surface entourée par la boucle, grandeurs qui furent déterminées par l'appareil de Weber. En considérant les enroulements hélicoïdaux comme un assemblage de telles boucles de courant et en intégrant leur effet, Weber put calculer avec précision l'angle de la rotation qui serait communiquée à la bobine bifilaire. Ses mesures réalisées dans un grand nombre de conditions expérimentales, furent conformes aux valeurs calculées à un tiers d'unité sur l'échelle près, c'est-à-dire à moins d'un arc de 6 secondes près.

En dépit de cet accord complet entre la théorie et la mesure, que Weber avait déjà obtenu avant 1845, il était toujours possible que la loi d'Ampère ne soit pas correcte dans toute sa spécificité, et une simple généralisation obtenue en écartant la force longitudinale aurait convenu tout autant. Après avoir reçu la lettre de Gauss du 19 mars, Weber s'aventura en *terra incognita* avec une confiance totale dans le jugement de son maître à penser.

La tâche qu'il se fixa fut de trouver une généralisation de la loi d'Ampère qui prendrait en compte le phénomène d'induction voltaïque, découverte par l'Américain Joseph Henry, cinq ans après qu'Ampère eût fini son travail sur l'électrodynamique. Ceci incluait les phénomènes suivants :

- l'apparition d'un courant électrique dans un circuit fermé lorsqu'il est en mouvement dans le voisinage d'un fil parcouru par un courant ;
- l'apparition d'un courant électrique dans un circuit fermé lorsqu'il y a un changement dans l'intensité du courant parcourant un conducteur dans son voisinage.

La loi électrodynamique d'Ampère ne s'appliquait qu'à des courants dans des conducteurs fixes. Par ailleurs, l'on connaissait la loi sur les forces électrostatiques : elle était indépendante de celle-là. L'existence du phénomène d'induction suggéra à Weber que les lois d'électrostatique et d'électrodynamique devraient s'inscrire dans une véritable loi fondamentale d'électricité sous une forme nouvelle plus générale. La conception développée par son collègue Gustav Fechner s'avéra être d'une importance cruciale.

Fechner avait étendu la conception d'Ampère des éléments de courant en considérant que le courant consiste en un déplacement de particules électriques de signes opposés se déplaçant avec la même vitesse dans des sens inverses le long du conducteur. (Aujourd'hui nous considérons que les particules positives sont virtuellement stationnaires et que les particules négatives seules se déplacent comme Weber sera le premier à le proposer). Dans un fil quelconque infiniment court, l'on trouverait une particule négative et une particule positive fonçant l'une vers l'autre. Ainsi l'interaction entre deux éléments de courant impliquerait en fait quatre interactions entre particules électriques. Si l'on désigne par e et e' les éléments de courant, il faut donc considérer les quatre relations suivantes :

(1) entre $+e$ et $+e'$
(2) entre $+e$ et $-e'$
(3) entre $-e$ et $-e'$
(4) entre $-e$ et $+e'$

Du fait que les particules sont ici confinées à leurs conducteurs, les forces qui agissent entre elles sont donc transformées en mouvement pour les conducteurs eux-mêmes.

Weber considéra donc que si un élément en suit un autre le long du

même fil, on se trouve alors dans la situation décrite par *la force longitudinale* d'Ampère (**Figure 6**). Si la loi d'électrostatique seule s'appliquait, alors les deux attractions de particules de signes opposés (2 et 4) seraient identiques aux deux répulsions de particules de même signe (1 et 3). Toutefois, de *l'hypothèse* cruciale dérivée des expériences d'Ampère, nous déduisons qu'il y a attraction ou répulsion entre éléments de courant selon leurs directions.

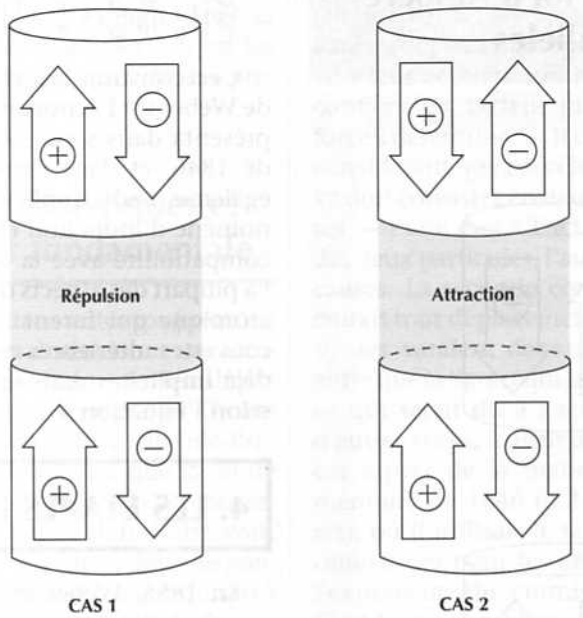
La question qui se pose est comment modifier la loi d'électrostatique afin de rendre compte de la force longitudinale ? Remarquons que dans le premier cas de la **Figure 6** les particules en mouvement relatif les unes par rapport aux autres sont celles de charges opposées (les particules de même signe se déplacent dans le même sens et donc ne sont pas en mouvement les unes relativement aux autres). Par contre dans le deuxième cas, ce sont les particules semblables qui sont en mouvement relatif. Dans le premier cas, la force qui en résulte est une répulsion ; dans le second cas, c'est une attraction. De cela, Weber tira le théorème selon lequel *la force électrostatique doit être réduite quand les particules électriques sont en mouvement relatif*, c'est-à-dire lorsqu'elles ont une vitesse relative.

La loi électrostatique est une simple loi du carré inverse. Si e et e' sont deux charges stationnaires séparées par une distance r, la force qui agit entre elle est simplement ee'/r^2. La vitesse relative de deux particules peut s'écrire dr/dt. Etant donné que le théorème de Weber s'applique à la fois si les particules s'approchent ou s'éloignent l'une de l'autre — c'est-à-dire lorsque le signe (sens) de leur vitesse relative est soit positif soit négatif — Weber introduit le carré dr^2/dt^2. Il donna donc l'expression de son théorème exprimant la force entre deux particules en mouvement longitudinal par :

$$\frac{ee'}{r^2}\left(1 - a^2 \frac{dr^2}{dt^2}\right)$$

où a est une constante à déterminer.

Figure 6 - Le développement de la loi d'Ampère par Weber : éléments longitudinaux



Pour élargir l'approche de Weber de manière à prendre en compte le phénomène nouvellement découvert de l'induction, Weber utilisa l'hypothèse de Gustav Fechner selon laquelle un courant consiste en deux flux opposés de particules électriques positives et négatives. De ce point de vue, un élément de courant contient une particule positive et une particule négative dans des mouvements opposés, représentés ici par le contenu de simples sections cylindriques du conducteur. Dans chacun des deux cas, le schéma représente deux de ces éléments de courant, se trouvant sur la même ligne le long du conducteur. Dans le premier cas, lorsque les éléments de courant (particules positive et négative pour Weber) se déplacent dans le même sens, d'après la théorie d'Ampère, il y a répulsion. Dans le deuxième cas, lorsque les particules positives et négatives se déplacent dans des sens opposés, il y a attraction d'après Ampère. Weber détermina à partir de ces déductions expérimentales d'Ampère, la dépendance en fonction de la vitesse de la loi de la force entre particules électriques.

Le cas parallèle

Les mêmes considérations doivent maintenant être appliquées au cas de deux éléments de courant perpendiculaires à la ligne joignant leurs points milieu (**Figure 7**). Ici, le résultat (attraction ou répulsion suivant que les courants se déplacent ou non dans le même sens) était connu d'Ampère dès ses premières expériences. L'interaction va maintenant être analysée comme ci-dessus selon l'hypothèse de Fechner.

La première chose que nous pouvons remarquer c'est qu'à l'instant précis où les deux éléments de courants sont face à face, *la vitesse relative* de toutes les particules électriques est nulle et donc la loi déduite ci-dessus ne peut expliquer la force résultante. En fait, on dit que deux particules s'approchant l'une de l'autre ont une vitesse relative négative, lorsque leurs chemins se rencontrent leur vitesse relative s'annule et lorsqu'elles s'éloignent l'une de l'autre, leur vitesse relative est positive. Au point de croisement, cette vitesse change donc de signe. Un changement de vitesse relative est en fait à une *accélération relative*. A l'instant considéré, quand les éléments de courant sont directement face à face, *ils ont donc une accélération relative mais pas de vitesse relative*.

Si maintenant nous observons le premier cas de la **Figure 7**, où l'effet net selon les expériences d'Ampère

est une attraction, on constate que ce sont les particules *de signe contraire* qui sont en mouvement relatif entre les deux éléments de courant. Dans le second cas, lorsque la force entre les éléments de courants est répulsive, ce sont les particules *de même signe* qui sont en mouvement relatif. Ainsi la situation est opposée à ce que l'on avait vu pour les éléments de courants longitudinaux, et plutôt que d'être diminuée, la force électrostatique doit être augmentée par la présence d'une accélération relative entre les particules. Ainsi Weber dut ajouter un terme à l'expression précédente ce qui donna :

$$\frac{ee'}{r^2}\left(1 - a^2\frac{dr^2}{dt^2} + b\frac{d^2r}{dt^2}\right) \qquad \textbf{Eq. 2}$$

où b est également une constante à déterminer.

Une autre considération doit ensuite intervenir : contrairement au cas précédent, les particules dans des éléments de courant parallèles ne se déplacent pas selon la même ligne droite. La fonction de leur distance étant déterminée [Weber, 1846, §19], l'on obtient

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{1}{r}\frac{dr^2}{dt^2}$$

Par suite, l'Equation 2 devient :

$$\frac{ee'}{r^2}\left(1 - a^2\frac{dr^2}{dt^2} + \frac{b}{r}\frac{dr^2}{dt^2}\right) \qquad \textbf{Eq. 2a}$$

Pour trouver la relation entre les coefficients a et b, Weber retourna une fois de plus aux travaux d'Ampère, et plus précisément au point signalé par Gauss dans sa lettre du 19 mars 1845. Le rapport des coefficients de l'Equation 2a n'est rien d'autre que le rapport de la force entre éléments de courants parallèles à la force entre éléments de courants longitudinaux ; c'est-à-dire la même relation dont Ampère avait déterminé la valeur absolue comme étant 1/2. Par conséquent, Weber posa :

$$a^2 = \frac{1}{2}\frac{b}{r}, \text{ ou } b = 2a^2r$$

à partir de quoi, l'expression générale de la force entre deux particules électriques devient :

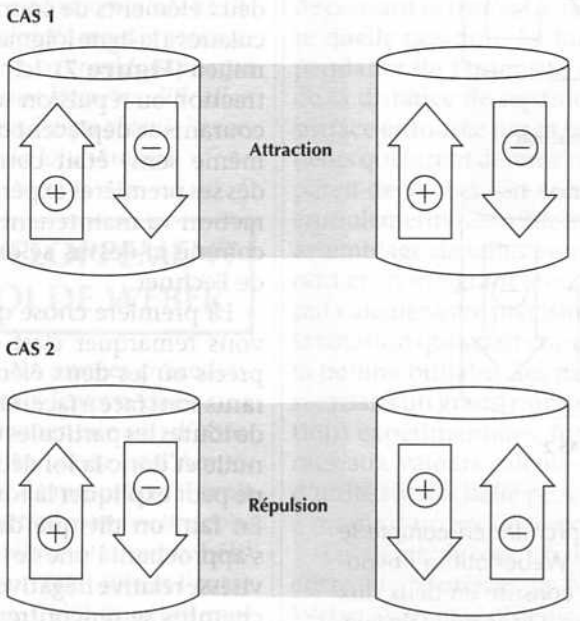
$$\frac{ee'}{r^2}\left(1 - a^2\frac{dr^2}{dt^2} + 2a^2 . r\frac{d^2r}{dt^2}\right) \qquad \textbf{Eq. 3}$$

Par considération des quatre interrelations qu'il existe entre les particules de chaque paire des éléments de courant, Weber divisa la constante a par quatre, pour trouver la forme finale de 1846 de son expression de la force entre deux particules électriques en mouvement :

$$\frac{ee'}{r^2}\left(1 - \frac{a^2}{16}\frac{dr^2}{dt^2} + \frac{a^2}{8}r\frac{d^2r}{dt^2}\right) \qquad \textbf{Eq. 4}$$

Ceci constitue la loi fondamentale de Weber sur l'action électrique qu'il présenta dans son célèbre mémoire de 1846, et dans lequel il montra également son application au phénomène d'induction et sa complète compatibilité avec la loi d'Ampère. La plupart des aspects de la physique atomique qui furent l'objet de découvertes ultérieures de Weber sont déjà implicites dans la formulation selon l'Equation 4.

Figure 7 - Le développement de la loi d'Ampère par Weber : éléments parallèles



Quand les éléments de courant sont parallèles, selon la théorie d'Ampère, il y a attraction dans le premier cas, lorsque les deux éléments se déplacent dans le même sens, et répulsion dans le second cas, lorsque les éléments se déplacent dans des sens opposés. Weber remarqua que les particules de même signe se déplacent dans le même sens dans le premier cas et en sens opposé dans le deuxième. Dans le cas longitudinal, les mêmes déplacements relatifs produisent des résultats opposés. Weber vit que dans le cas parallèle, la vitesse relative des particules était nulle mais qu'elles avaient une accélération relative. C'est de là que vient le terme d'accélération dans sa loi fondamentale d'électricité.

4. LES ÉTAPES FINALES

En 1855, Weber et Rudolf Kohlrausch réalisèrent des expériences qui déterminèrent avec précision la valeur de la constante longtemps désignée par a. Ils trouvèrent que 4/a = 4,395 x 10^{11}mm/s, et cette valeur désignée par la suite par c fut connue sous le nom de *constante de Weber*[2]. Pour Weber, la signification physique de cette constante est « *la vitesse relative que les masses électriques e et e' doivent avoir et conserver pour que l'action de l'une sur l'autre soit nulle* » [Weber et Kohlrausch, 1856, p.20]. Sa loi fondamentale fut alors écrite :

$$\frac{ee'}{r^2}\left(1 - \frac{1}{c^2}\frac{dr^2}{dt^2} + \frac{2r}{c^2}\frac{ddr}{dt^2}\right) \qquad \textbf{Eq. 5}$$

Dans un commentaire ajouté au rapport d'expérience publié avec Kohl-

hrausch en 1856, Weber montra la direction que sa pensée allait prendre dans les années suivantes. Weber fit remarquer que la valeur extrêmement faible du coefficient $1/c^2$ « *permet de saisir pourquoi l'effet électrodynamique des masses électriques (...) semble toujours infinitésimalement faible par rapport à l'effet électrostatique, de sorte qu'en général le premier ne demeure significatif, comme pour des courants galvaniques, que lorsque les forces électrostatiques s'annulent réciproquement en vertu de la neutralisation des électricités positive et négative* ». [Weber et Kohlrausch, 1856, p.21].

Il deviendra rapidement clair que Weber cherchait déjà un moyen d'accéder au niveau des forces qui règnent entre ces petites particules de charge électrique que nous appelons aujourd'hui *atomiques*. Son commentaire montre qu'il ne voyait pas alors de chemin expérimental pour atteindre ce but. La puissance de son travail ultérieur réside largement dans sa détermination à pousser à fond les implications théoriques de ses premiers travaux.

Forces catalytiques et longueur fondamentale

Avançons dans le temps jusqu'en 1870, Weber était alors sous une attaque soutenue de la part de Helmholtz et Clausius en Allemagne et Thomson, Tait et Maxwell en Grande-Bretagne. Ils prétendaient que la loi de Weber violait le principe de conservation de l'énergie. Helmholtz avait construit un exemple dans lequel, selon lui, la loi de Weber conduisait à une *vis viva* (force vive) infinie.

Dans un traité publié en 1871, son sixième mémoire de la série intitulée *Déterminations électrodynamiques de la mesure* (Weber 1871), non seulement Weber répond de manière dévastatrice à ses critiques, mais découvre également, à partir simplement d'une analyse théorique de sa loi fondamentale d'électricité, des principes de base de la physique atomique, pour lesquels il n'y eut de confirmation empirique que des décennies plus tard. Dans les premières pages de son mémoire, l'on trouve sans doute la plus étonnante de ses découvertes : la détermination de la distance minimale en dessous de laquelle la force de Coulomb de répulsion entre particules de même signe s'inverse et devient attractive.

Tout d'abord, Weber constata que les particules électriques positive et négative désignées par e et e', ne sont pas des masses au sens mécanique du terme. Avant l'expression actuelle de *charge électrique*, l'on utilisait celle de *masse électrique*. Weber établit la distinction entre charge et masse mécanique, exprimant la première par e et la seconde par ε. Il reconnut alors que lorsque les quantités de charge de deux particules électriques positive et négative sont égales, leurs masses ne sont pas nécessairement identiques. Il aboutit ainsi pour la première fois en page 3 de son mémoire aux concepts modernes de rapport de charge-à-masse et rapport de masse électron-proton.

Weber examina ensuite une affirmation sous-jacente à sa loi fondamentale sur l'action électrique. En fait, l'expression de la force exercée par les particules e et e' l'une sur l'autre, dépend d'une grandeur, à savoir leur accélération relative, « qui contient en facteur précisément la force à déterminer ». Il clarifie cela en considérant que l'accélération relative doit consister en deux composantes — l'une due à l'action mutuelle des deux particules, l'autre à d'autres causes. La seconde composante inclurait tout déplacement que les particules auraient dans une direction autre que la ligne r qui les relie, et tout ce qui serait dû à l'action sur elles d'autres corps. Il avait déjà considéré cet aspect de la matière dans son mémoire de 1846 (p.212 et suivantes), où il utilisait le terme de *forces catalytiques* pour les décrire, d'après l'expression du chimiste Berzelius. C'est là, en considérant à part le terme mathématique de la force d'accélération que chaque particule exerce sur l'autre, qu'il put déduire une expression de sa loi fondamentale, indépendante du terme d'accélération causé par leur action mutuelle, mais contenant toujours un terme f, exprimant l'accélération due à d'autres causes.

L'expression obtenue est la suivante :

$$\frac{ee'}{rr-\frac{2r}{cc}(e+e')}\left(1-\frac{1}{cc}\frac{dr^2}{dt^2}+\frac{2rf}{cc}\right) \quad \textbf{Eq. 6a}$$

Mais en faisant la distinction entre la charge (e, e') et la masse (ε, ε') des particules électriques, Weber montra dans son *Sixième mémoire* [Weber 1871, pp. 2-6] que l'expression devint alors :

$$\frac{ee'}{rr-\frac{2r}{cc}\frac{\varepsilon+\varepsilon'}{\varepsilon\varepsilon'}ee'}\left(1-\frac{1}{cc}\frac{dr^2}{dt^2}+\frac{2rf}{cc}\right) \quad \textbf{Eq. 6b}$$

Weber ajouta : « *De ceci résulte que la loi de la force électrique n'est en aucun cas aussi simple que nous pourrions l'espérer pour une loi fondamentale ; au contraire, elle semble à deux égards particulièrement complexe* ». La première cause de complexité réside dans les forces catalytiques citées ci-dessus. La seconde est l'apparition d'une longueur singulière, associée à l'inversion de la force de Coulomb. Weber décrivit ainsi cet aspect de sa découverte :

« *En second lieu, un autre résultat remarquable découle de cette expression de la force — à savoir que quand les particules e et e' sont de la même espèce, elles ne se repoussent pas dans toutes les circonstances ; ainsi lorsque* $dr^2/dt^2<cc+2rf$, *elles se repoussent tant que*

« $r>\frac{2}{cc}\frac{\varepsilon+\varepsilon'}{\varepsilon\varepsilon'}ee'$

« *et au contraire, elles s'attirent quand*

« $r<\frac{2}{cc}\frac{\varepsilon+\varepsilon'}{\varepsilon\varepsilon'}ee'$ ».

Ce résultat remarquable n'est rien de plus qu'une conséquence mathématiquement nécessaire de l'expression de la loi fondamentale de Weber donnée ci-dessus. Il est facile de voir que lorsque e et e' sont deux particules similaires, l'expression donne $4e^2/\varepsilon c^2$. Si l'on ajoute que la constante de Weber est en fait $\sqrt{2}$ x la vitesse de la lumière, nous avons en termes modernes où c désigne la vitesse de la lumière et m_e la masse de l'électron, l'expression familière :

$$\frac{2e^2}{m_e c^2}.$$

C'est la distance au-delà de laquelle deux électrons ne peuvent s'approcher, qui, divisée par deux, nous donne le rayon de l'électron classique de $2{,}8.10^{-13}$ cm. Lorsque la masse du proton est insérée dans l'expression de Weber, on obtient la valeur $3{,}06.10^{-16}$cm — qui est peut-être trop basse pour l'interaction forte mais qui en tout cas est une approximation très intéressante pour 1870 !

Le texte de Weber de 1871 regorge de richesses. Les lois du mouvement de l'électron autour du noyau central en sont un résultat, la détermination

du mouvement de deux particules similaires est rendue possible, à savoir qu'elles ne peuvent pas avoir un mouvement orbital, mais une oscillation le long d'une même ligne — comme si elles étaient attachées par un élastique. De ce dernier point, Weber tentera de trouver la base de la production des oscillations pour les fréquences lumineuses. L'attaque stupide de Helmholtz pour tenter de montrer que la formulation de Weber ferait atteindre à des particules électriques une *énergie infinie*, est finalement balayée en remarquant qu'Helmholtz supposait que les particules pourraient également atteindre *une vitesse relative infinie*. Weber affirme que sa constante *c* doit plutôt être vue comme correspondant à une *vitesse limite* pour les particules électriques.

Tout ceci sont les résultats remarquables de l'intervention singulière de Gauss dans sa lettre du 19 mars 1845. Sa reconnaissance de *l'existence réelle* d'une simple idée, qui était apparue dans l'esprit d'Ampère dès 1823, conduisit à la découverte des concepts les plus cruciaux en physique moderne. C'est ainsi qu'une *idée* scientifique, c'est-à-dire une substance incolore, inodore et insipide, change le cours de l'histoire.

Cependant, aucun de ces remarquables accomplissements de la lignée Ampère-Gauss-Weber, que nous venons de passer en revue, n'est reconnu dans les textes d'histoire classiques ni dans les manuels scolaires d'aujourd'hui. Ce n'est que lorsque l'on fouille dans les recoins des documentations de spécialistes que l'on peut trouver mention de ces faits — toujours présentés comme des événements isolés, sans aucune cohérence. Comment est-il possible que les noms d'Ampère, de Gauss et de Weber ne soient jamais mentionnés quand la physique des atomes est enseignée ? Si le nom d'Ampère apparaît, ce n'est qu'en relation avec l'électricité et le magnétisme. La loi de la force électrique qu'il a réellement découverte est presque impossible à trouver dans un manuel moderne ; sous le nom d'Ampère apparaît quelque chose de sensiblement différent. Le nom de Weber est rarement cité.

Aujourd'hui, les étudiants en physique et électricité apprennent que toutes les lois de l'électrodynamique sont incluses dans les formules ingé-

Les critiques contre Ampère et Weber

L'hypothèse révolutionnaire d'Ampère selon laquelle le magnétisme provient d'orbites électriques autour des particules de matière, devint la base des premiers développements de la science de l'atome par Gauss, Weber et d'autres. Toutefois, beaucoup ne pouvaient pas comprendre son hypothèse, ni accepter le fait que ses conséquences mathématiques impliquaient un rejet de la mécanique newtonienne.

Parmi les principaux critiques des travaux d'Ampère et de Weber, l'on trouve Hermann Grassmann, James C. Maxwell et l'ingénieur anglais Oliver Heaviside. Grassmann attaqua l'hypothèse d'Ampère en la qualifiant « d'improbable », mais sans en donner la raison. Maxwell prit une position intermédiaire en permettant l'hypothèse d'Ampère mais en rejetant son développement par Weber. La position de Heaviside reflète de manière typique l'empirisme que l'on rencontre encore si souvent dans la science d'aujourd'hui. Sa suggestion de transformer la contribution d'Ampère en ce qu'elle n'est pas, a été adoptée par la plupart des manuels scolaires modernes.

« Lorsque je soumis l'explication proposée par Ampère sur l'interaction de deux sections de courant infiniment petites, à une analyse plus rigoureuse, cette explication me sembla hautement improbable... »

Hermann Grassmann
Une nouvelle théorie de l'électrodynamique, 1845.

« Il existe aussi des objections à l'idée que des forces ultimes de la nature puissent dépendre de la vitesse des corps entre lesquelles elles agissent. Si les forces de la nature sont réductibles à des forces agissant entre des particules, d'après le principe de conservation de la Force, ces forces doivent agir selon la ligne qui joint ces particules et être fonction de leur distance seulement. »

James Clerck Maxwell
Sur les lignes de force de Faraday, 1854

« Il a été établi, par une non moindre autorité que celle de ce grand homme qu'était Maxwell, que la loi d'Ampère sur la force entre une paire d'éléments de courant est la formule cardinale de l'électrodynamique. Si cela est vrai ne devrions-nous pas toujours l'utiliser ? Ne l'utilisons-nous jamais ? Maxwell l'utilisa-t-il dans son Traité ? Il y a certainement une erreur. Je ne voudrais pas enlever à Ampère le crédit d'être le père de l'électrodynamique : je voudrais simplement transférer le nom de formule cardinale à une autre que nous lui devons également, formule exprimant la force mécanique appliquée sur un élément de conducteur parcouru par un courant, placé dans un champ magnétique — le produit vectoriel du courant par l'induction. Il y a quelque chose de vrai dans celle-là ; ce qui n'est pas le cas pour sa force entre une paire d'éléments non fermés. La première est fondamentale et tout le monde sait qu'elle est d'un usage permanent que ce soit en fait ou virtuellement (par la force électromotrice), aussi bien par les théoriciens que par les ingénieurs. »

Oliver Heaviside
dans *L'électricien, 1888.*

nieuses inventées par James Clerck Maxwell et codifiées dans son *Traité sur l'électricité et le magnétisme*. On leur montre qu'il n'est pas nécessaire d'étudier Ampère et Weber parce que Maxwell a tout fait. Il nous a même rendu le service d'éliminer certaines « erreurs » que l'on aurait pu trouver chez ceux-là. Et ce fut un travail très minutieux[3].

Mais où est passée la méthode de découverte ? Est-ce inutile pour les étudiants d'aujourd'hui ? Avec toutes nos connaissances aujourd'hui, enseigner comment nous savons ne pourrait que créer de la confusion ? (Il faudrait même sans doute être fou pour se quereller sur un tel sujet). Cependant ce n'est pas que la méthode qui manque, ce sont aussi ses résultats. D'où viennent le rayon de l'électron classique, la force forte nucléaire, la valeur limite de la vitesse de la lumière ? Pas d'Ampère, de Gauss ni de Weber d'après les manuels actuels et les autorités en place. Avons-nous exagéré d'une quelconque manière en utilisant le terme *publicité mensongère* pour décrire l'éducation scientifique à l'université qui commet des oublis aussi criants ? Est-ce une fraude ou un accident ? Nous espérons avoir donné au lecteur suffisamment de pistes pour qu'il puisse enquêter et se faire une idée par lui-même. ■

Laurence Hecht est rédacteur au magazine 21st Century. Associé à Lyndon LaRouche, il a écrit son article dans une prison de Virginie où il purge une peine de 33 ans, victime d'une chasse aux sorcières politique lancée sous l'administration Bush.

Notes

1. Le développement mathématique de l'hypothèse d'Ampère, d'une force agissant le long d'une ligne droite reliant deux éléments, et certaines références non critiques présentes dans les premières pages de son *Mémoire* de 1826 ont faussement induit certains interprètes, dont Maxwell, à voir en Ampère un newtonien. Ils se sont totalement trompés. Le *Mémoire* d'Ampère de 1826 est plutôt une sorte de preuve de Gödel pour la physique expérimentale : travailler du point de vue des axiomes de Newton afin de montrer l'absurdité de coller aux axiomes de Newton sur le point masse et sur l'espace-temps simplement continu et linéairement étendu. Sans y faire référence de manière explicite, Ampère adresse les mêmes critiques à l'égard des axiomes de Newton que Gottfried W. Leibniz un siècle plus tôt dans sa fameuse correspondance avec le porte-parole de Newton, Samuel Clarke, et dans sa *Monadologie*. Immédiatement après la fin de son *Mémoire* de 1826, Ampère tourna son attention vers les aspects les plus profonds de son travail expérimental, devenant ainsi un champion de la méthode leibnizienne à partir de cette date, jusqu'à sa mort en 1836.

La fraude de Leonhard Euler au sujet de Leibniz, qui persiste de manière générale aujourd'hui encore dans la physique mathématique, est le fondement de l'impuissance de Maxwell et de tous les spécialistes ultérieurs à reconnaître cet aspect essentiel de la contribution d'Ampère. Alors que la science devrait répondre à de telles questions à partir de mesures expérimentales, Euler prétendit réfuter l'insistance de Leibniz sur l'existence de structures atomiques à l'intérieur des « petites billes dures » de la cosmologie newtonienne, en ayant recours à un artifice d'écriture dans sa *Lettre à une princesse allemande*. Pour défendre l'existence d'un simple construct mathématique — ses inévitables séries infinies — Euler essaya de prouver *l'existence physique* d'un espace-temps simplement continu en divisant successivement une ligne droite en autant de parties que l'esprit peut en imaginer (*« aussi près que vous le désirez »* dira Augustin Cauchy dans une version plus raffinée de la même ruse). C'est ainsi qu'à partir d'un artifice de mathématicien, on a fait circuler une erreur de génération en génération chez des étudiants crédules.

Voir également, Lyndon LaRouche, « Riemann Refutes Euler », *21st Century Science & Technology*, Winter 1995-1996, pp36-47.

2. L'expérience détermina en fait le rapport de la mesure mécanique de l'intensité du courant aux trois autres mesures existantes, à savoir : électromagnétique, électrodynamique et électrolytique. La valeur donnée ci-dessus, celle de la constante de Weber est le rapport de la mesure mécanique à la mesure électrodynamique. Weber fut le premier à montrer, en 1846, que le rapport de l'unité électrodynamique à l'unité électromagnétique est de $\sqrt{2}:1$. Ainsi, le rapport déduit expérimentalement de la mesure mécanique de l'intensité du courant à la mesure électromagnétique fut 3.1074×10^{11} mm/s. Bernhard Riemann qui assista à l'expérience de Weber et Kohlrausch, fut le premier à remarquer que cette valeur correspondait de très près à la valeur de la vitesse de la lumière déterminée expérimentalement par Fizeau. Sa théorie du *potentiel retardé* vient de là : Riemann s'attaqua-là au problème non résolu auquel Gauss avait fait allusion dans sa lettre du 19 mars 1845 :

« J'aurais sans aucun doute rendu mes recherches publiques depuis longtemps, si au moment où je les ai interrompues il n'avait pas manqué ce que je considérais en être la clef de voûte (...) c'est-à-dire, comment déterminer les forces additionnelles (qui transforment l'action réciproque de particules électriques au repos, lorsque ces dernières sont en mouvement relatif) à partir de l'action qui n'est pas instantanée, mais qui au contraire (d'une manière comparable à la lumière) se propage dans le temps. »

3. Maxwell était un très bon mathématicien en analyse et particulièrement doué en physique et en géométrie. Son ignorance complète en matière de méthode, qui prit la forme d'une adhésion servile à l'empirisme, l'empêcha de comprendre le problème profond que Gauss posait ci-dessus (note 2). A propos du défi que Gauss lança, Maxwell écrivit avec entêtement : *« Nous sommes incapables de concevoir une propagation dans le temps autre que le déplacement d'une substance matérielle dans l'espace ou que la propagation d'une condition de mouvement ou de contrainte dans un médium déjà existant dans l'espace »* [Treatise, p. 492].

Le rejet de la part de Maxwell de ce qu'il ne comprenait pas, prit de plus en plus l'aspect d'un préjugé ignorant. Il n'y avait rien d'original dans son idée d'un éther, médium de propagation de l'action électromagnétique. Si Gauss avait vu une solution claire à partir d'un tel mode de représentation, il l'aurait développé. Il n'y en avait pas, comme devrait le montrer l'incapacité de la théorie de Maxwell pour rendre compte de l'existence même de l'électron.

Références

André-Marie Ampère, 1826, *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience*, Paris, A. Hermann, 1883.

James Clerck Maxwell, 1873, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Vol. 1 et 2, New York, Dover, 1954.

Wilhelm Eduard Weber, 1846, « Elektrodynamische Maasbestimmungen über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung », in *Wilhelm Webers Werke*, Berlin, Julius Springer, 1893.

Wilhelm Eduard Weber et R. Kolhrausch, 1856, « Ueber die Elektricitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch der Querschnitt der Kette fliesst », *Annalen der Physik und Chemie*, herausgegeben von J.C. Poggendorf, Vol. 99, pp.10-25.

Wilhelm Eduard Weber, 1871, « Elektrodynamische Maasbestimmungen, insbesondere über das Princip der Erhältung der Energie », *Abhandlungen der mathem.-phys. Classe der Koenigl. Sachsischen Gesellschaft der Wissenschaften*, Vol. X (Jan).