



## Suite à l'article sur l'antigravitation

# Les paradoxes de l'électrocinétique

**La gravitation est un sujet qui intéresse plus le public cultivé, par la proportion de gens concernés, que les physiciens eux-mêmes, lesquels sembleraient avoir, depuis des décennies, renoncé à l'espoir de découvrir des faits pouvant en permettre la maîtrise. Cette attitude s'inscrit dans le contexte général de réductionnisme qui règne actuellement en matière scientifique et qui souhaite tout expliquer à partir des lois de l'infiniment petit, celles de la mécanique quantique par exemple. Le dernier résistant de renom à cet envahissement a été Einstein dont malheureusement la théorie géométrique de la gravitation n'est qu'une description phénoménologique qui ne permet pas de déboucher sur une quelconque application. En effet, nous, humains, n'avons de prise sur notre milieu que par l'intermédiaire de l'électromagnétisme, et l'existence d'une « électrogravitation » demeurerait jusqu'à ces dernières dizaines d'années quelque peu hypothétique. Un certain nombre de faits expérimentaux cependant permettent d'en envisager la réalité et il semblerait que la circulation de courants électriques dans les milieux condensés, dans des conditions particulières, par brisure macroscopique de symétrie, peut provoquer d'authentiques effets gravitationnels.**

RÉMI SAUMONT

**L**a propagation des effets de l'électricité est fort différente en fonction du milieu dans lequel elle a lieu. En effet, le flux d'électrons dans le vide d'un tube de télévision n'a pas grand-chose à voir avec le transport d'énergie dans les fils de cuivre ou d'aluminium d'un réseau de distribution ou, *a fortiori*, dans celui des charges sur la courroie d'un générateur à haute tension de type Van de Graaf.

En vérité, nous ne savons pas toujours exactement ce que sont réellement ces courants électriques avec lesquels nous sommes si familiers (non seulement ils nous chauffent, nous éclairent, animent nos robots domestiques, assurent la transmission de nos informations, communications et divertissements, mais ils nous permettent même de négliger la table de multiplication grâce aux calculatrices...). Et cette ignorance n'est pas seulement le fait du citoyen moyen, elle est aussi malheureusement partagée, de manière plus inattendue, par beaucoup d'ingénieurs ou d'enseignants.

A titre d'exemple, je me suis livré à une expérience. J'ai posé à brûle-pourpoint à divers scientifiques de mes amis la question anodine mais quelque peu perverse suivante : « *A votre avis, et sans réfléchir plus avant, quelle est la vitesse moyenne de trans-*

port des électrons correspondant au passage d'un courant continu de 1 A dans un fil de cuivre de 1 mm de diamètre ? »

Les réponses ont été édifiantes ! Une seule correspondait à l'ordre de grandeur correct, les autres se sont échelonnées entre quelques dizaines de centimètres et cent mètres par seconde. La réponse d'un ingénieur électronicien, connaissant pourtant parfaitement l'électrodynamique quantique et n'ignorant rien de l'effet Hall ou du comportement des jonctions Josephson, a été celle-ci : « Oh, je sais que c'est très lent. Dans ces conditions, ça ne dépasse guère les 10 cm/s. »

Si une telle vitesse du flux d'électrons était possible, elle entraînerait à coup sûr la fusion du fil.

Et que dire de ce rédacteur d'une revue de vulgarisation scientifique française à grand tirage, que j'aurai la charité de ne pas nommer, qui a écrit dans un numéro de février 1991 au cours d'une réponse à un lecteur à propos des électrons circulant dans un circuit : « Leur vitesse de déplacement dans le cuivre étant de l'ordre du mètre par seconde »...

Là, ce ne serait pas une simple fusion mais, compte tenu de l'importance de l'énergie mise en œuvre, des explosions peut-être meurtrières.

Le lecteur non averti trouvera donc la valeur correcte de cette vitesse plus loin dans le texte.

Cet article a été rédigé en réponse au courrier reçu à propos de mon dernier article paru dans le numéro de mai-juin de *Fusion* sur l'antigravitation et qui décrivait l'existence d'une anomalie gravitationnelle provoquée par le passage du courant électrique dans un fil conducteur. Divers lecteurs, paraissant ignorer les conditions réelles de circulation des électrons libres dans les métaux, m'ont adressé des courriers expliquant les résultats obtenus soit par un effet inertiel qui serait dû, par exemple, au choc des électrons agissant par leur masse au niveau des coudes du fil, soit au niveau du réseau cristallin de celui-ci, en négligeant toutefois le fait qu'un métal n'est pas un monocristal mais au contraire une mosaïque de microcristaux d'orientations diverses.

Cet article a donc pour but de faire la critique de ces réponses et, à cette occasion, de faire le point sur nos connaissances en électrocinétique

en mettant en évidence l'existence des nombreux paradoxes et insuffisances entachant cette discipline.

En effet, si l'application des théories quantiques a fait faire de grands progrès en microélectronique dans le développement des transistors et des circuits intégrés, il n'en demeure pas moins qu'elle ne permet pas pour l'instant, à plus grande échelle, de résoudre un certain nombre de problèmes de cinétique et d'électrodynamique qui, curieusement, sont souvent passés sous silence dans les ouvrages *ad hoc*.

## Très brève histoire de l'électricité

Comme pour beaucoup d'autres disciplines, il faut remonter à l'époque de la Grèce antique pour trouver les premières descriptions de phénomènes électriques et le terme « électricité » (*vis electrica*), probablement créé par William Gilbert médecin de Jacques 1<sup>er</sup> d'Angleterre, dérive du Grec « *elektron* » qui désignait l'ambre jaune ou succin, substance qui une fois frottée par une étoffe ou une peau de chat se montrait capable de retenir des fragments de substances légères par ce que l'on a appelé plus tard l'attraction électrostatique. En fait, la science de l'électricité s'est lentement constituée à partir de simples observations des phénomènes de ce genre.

Ce n'est en effet qu'à partir du début du XVII<sup>e</sup> siècle que les premières machines permettant de produire ou de stocker à volonté de l'électricité statique furent mises au point : les machines électrostatiques d'Otto von Guericke et de Huygens ainsi que, plus tard, les bouteilles de Leyde (1745), ancêtres des condensateurs modernes. Les expériences et les mesures de plus en plus précises permirent alors, surtout grâce à Henry Cavendish et Charles Augustin Coulomb, de passer du qualitatif au quantitatif.

Il faudra attendre cependant la découverte de la pile électrique par Alessandro Volta vers 1800 pour passer à l'électricité dynamique, c'est-à-dire à celle qui, par le « flux » d'un « courant » électrique dans un milieu conducteur, permet d'obtenir des effets mécaniques ou chimiques

notables. Il faut aussi mentionner la fameuse expérience d'Erstedt montrant l'action d'un courant électrique sur l'aiguille aimantée de la boussole qui marqua le début de ce que l'on a appelé l'« électrodynamique ».

Les progrès sont alors plus rapides et la jonction théorique est faite entre l'électricité et le magnétisme (connu lui aussi depuis l'Antiquité), et cela grâce aux travaux de Georg Simon Ohm et surtout d'André Marie Ampère établissant les lois rigoureuses de cette discipline naissante qui bénéficiera ensuite des travaux de Pierre Simon de Laplace et de Carl Friedrich Gauss sur le plan théorique ainsi que des recherches expérimentales de Michael Faraday.

La notion même de courant électrique a cependant précédé l'avènement de l'électrodynamique puisqu'elle semble remonter à 1746 avec Louis Guillaume Le Monnier (1717-1799), auteur du chapitre « Electricité » de l'*Encyclopédie*. Le Monnier utilisa en effet les premières bouteilles de Leyde pour montrer qu'un fil métallique réunissant les armatures provoque la décharge de la bouteille en un temps très court ce qui lui permettra d'affirmer qu'il circule dans le fil de la « matière électrique » avec une vitesse au moins « trente fois supérieure à celle du son ». En l'occurrence, il faisait déjà la confusion classique entre propagation d'ébranlement et vitesse effective des charges.

La bouteille de Leyde emmagasine l'électricité sous une tension, c'est-à-dire une différence de potentiel, correspondant à une force électromotrice très élevée (50 000 V, par exemple) et, en raison de sa résistance électrique interne prohibitive, elle ne peut pas fournir des courants d'intensité suffisante (supérieure à quelques microampères) pour produire des effets mécaniques ou chimiques notables. Toutefois, ce n'est pas le cas de la pile de Volta qui, pour une force électromotrice de l'ordre seulement du volt par élément de pile, pouvait fournir des courants d'une intensité de l'ordre de l'ampère et plus en fonction de la taille des électrodes.

La découverte de la pile électrique fut donc une véritable révolution qui est à l'origine de toutes les découvertes qui ont suivi. Les phénomènes électriques ne seront plus alors des curiosités réservées aux cabinets de

physique comme celui de l'abbé Jean Antoine Nollet ou aux amusements de salon. Elles prendront une place croissante dans les laboratoires pour finalement déboucher sur les applications industrielles majeures qui sont celles dont bénéficie maintenant notre civilisation moderne.

L'électricité de la pile n'était pas seulement capable de produire des effets mécaniques, elle avait aussi le pouvoir de produire des actions chimiques, comme l'a montré Humphry Davy en découvrant le sodium et le potassium par l'électrolyse en 1812, mécanisme à partir duquel Jöns Jacob Berzelius établit une théorie électrochimique de la matière montrant que toute combinaison chimique est l'union d'un constituant électropositif et d'un constituant électronégatif.

On rejoignait ainsi la conception dualiste de l'électricité de Charles François du Fay qui, au début des années 1700, distinguait l'électricité « vitreuse » de l'électricité « résineuse ». On sait maintenant qu'il existe des charges électriques dites « positives » et d'autres qualifiées de « négatives », et que les charges de mêmes signes se repoussent alors que celles de signes contraires s'attirent. Cependant, à l'époque, cette interprétation était encore très floue.

Ce n'est véritablement qu'à partir de la découverte de l'électron et des diverses particules chargées que ces notions ont pris de la consistance.

La découverte de l'électron est un cas d'école car il est impossible d'en attribuer le mérite à un seul ou même quelques chercheurs. Ce fut en réalité l'œuvre collective et de longue haleine de nombreux savants dispersés.

Ce fut tout d'abord l'étude de décharges électriques dans les gaz raréfiés menée par Michael Faraday, poursuivie par Julius Plücker puis par Robert Wilhelm Bunsen et Robert Kirchhoff. Ensuite, il y eut la découverte en 1886 des rayons canaux par Eugen Goldstein. Enfin, Heinrich Rudolf Hertz découvrit, en utilisant un vide plus poussé, les rayons dits « cathodiques », travaux suivis par ceux de Jean Perrin puis de Joseph John Thomson.

En cette fin du XIX<sup>e</sup> siècle, deux interprétations s'affrontaient à leur propos : celle de Goldstein, Hertz et Lénard qui, compte tenu de leur

propagation rectiligne susceptible d'impressionner les plaques photographiques, les considéraient comme une émission lumineuse de courte longueur d'onde, et celle de William Crookes, Jean Perrin et J.J. Thomson qui pensaient, après avoir constaté leur incurvation par un champ magnétique, qu'il s'agissait d'un flux de particules chargées négativement. C'est évidemment cette dernière interprétation qui a prévalu et cela d'autant plus qu'une étude théorique de Henrick Antoon Lorentz prédisait l'existence de ces particules chargées en leur associant, en vertu de la théorie électromagnétique de James Clerk Maxwell, un champ électrique et un champ magnétique. Le nom d'électron fut attribué à ces particules par George J. Stoney, particules considérées tout

d'abord comme des quantités d'électricité élémentaires sans qu'il leur soit associée une masse d'inertie.

C'est l'ensemble de tous ces travaux fondamentaux qui, après moult développements, ont conduit les physiciens à considérer que tout courant électrique consiste en un déplacement d'ensemble de corpuscules électrisés, ces corpuscules pouvant être des ions négatifs, positifs ou surtout de simples électrons. Ce déplacement pouvait non seulement se faire dans le vide, les gaz ou les liquides conducteurs, mais aussi dans les métaux à l'état solide et cela, dans le cas des métaux, pratiquement sans transport de matière autre que celui très très lent des électrons libres dans les réseaux cristallins.

Dans les métaux, il s'agit en effet

### Encadré 1 - Calcul de la vitesse d'ensemble d'un flux continu d'électrons dans un conducteur

Lorsqu'on applique une différence de potentiel continue entre les deux extrémités d'un fil conducteur, en cuivre par exemple, les électrons libres au sein de ce conducteur sont attirés vers le pôle positif et il en résulte la circulation d'un courant d'intensité  $i$ . La vitesse moyenne  $v$  de ces électrons est par définition le quotient de la distance parcourue  $a$  par le temps de parcours  $t$ .

On connaît le nombre d'électrons libres existant dans différents corps conducteurs. Pour le cuivre, il y a un électron libre par atome, ce nombre par centimètre cube est donc :  $k = 8,5 \cdot 10^{22}$ .

Soit  $s$  la section droite du conducteur. Au bout du temps  $t$ , les électrons libres contenus dans le volume  $s \cdot a$  auront traversé cette section. Le nombre d'électrons libres contenu dans ce volume est :  $k \cdot s \cdot a = k \cdot s \cdot v \cdot t$ .

La charge électrique d'un électron  $e$  est  $1,59 \cdot 10^{19}$  coulombs, et la charge totale  $Q$  des électrons qui auront traversé la section  $s$  est :  $k \cdot s \cdot v \cdot t \cdot e$ .

Par définition, l'intensité  $i$  d'un courant continu est le nombre de coulombs qui s'écoulent par seconde :

$$i = Q / t.$$

Donc

$$k \cdot s \cdot v \cdot t \cdot e = i \cdot t$$

et

$$v = i / k \cdot s \cdot e$$

En termes de densité de courant :

$$j = i / s$$

On aura :

$$v = j / k \cdot e$$

Connaissant les valeurs numériques indiquées plus haut des termes du second membre, il est aisé de constater que pour les valeurs usuelles de  $i$  (intensité du courant de l'ordre de l'ampère) et  $s$  (la section du fil de cuivre de l'ordre du millimètre carré), la vitesse moyenne du flux d'électrons est de l'ordre du dixième de millimètre par seconde.

Il s'agit là d'un calcul inspiré de celui donné dans le numéro de mars 1961 de la *Revue générale d'électronique* (p. 47).

Il fournit un ordre de grandeur qui ne tient pas compte des effets à caractère quantique découlant de l'application de la théorie de Félix Bloch. Il n'en demeure pas moins que pour un conducteur de cuivre industriel le nombre de défauts cristallins est tel (théorie de Drude) que l'on peut considérer la valeur obtenue comme très proche de la réalité.

Par contre, bien sûr, la vitesse de la perturbation électrique due à l'établissement du courant se propage, elle, comme toute perturbation électromagnétique, à la vitesse de la lumière.

d'un transport de matière de grandeur pondérale infime compte tenu de la faible masse des électrons et de leur très faible vitesse de transport (**Encadré 1**).

La mesure du rapport entre la charge et la masse d'inertie de l'électron ( $e/m$ ) a été effectuée pour la première fois par J.J. Thomson en 1897. Elle a mis en évidence la grandeur de ce rapport. La précision de cette mesure a ensuite été améliorée par Robert Andrews Millikan en 1908. Il a été facile par ailleurs de déterminer la masse de l'électron qui est 1836 fois plus faible que celle du noyau de l'atome d'hydrogène.

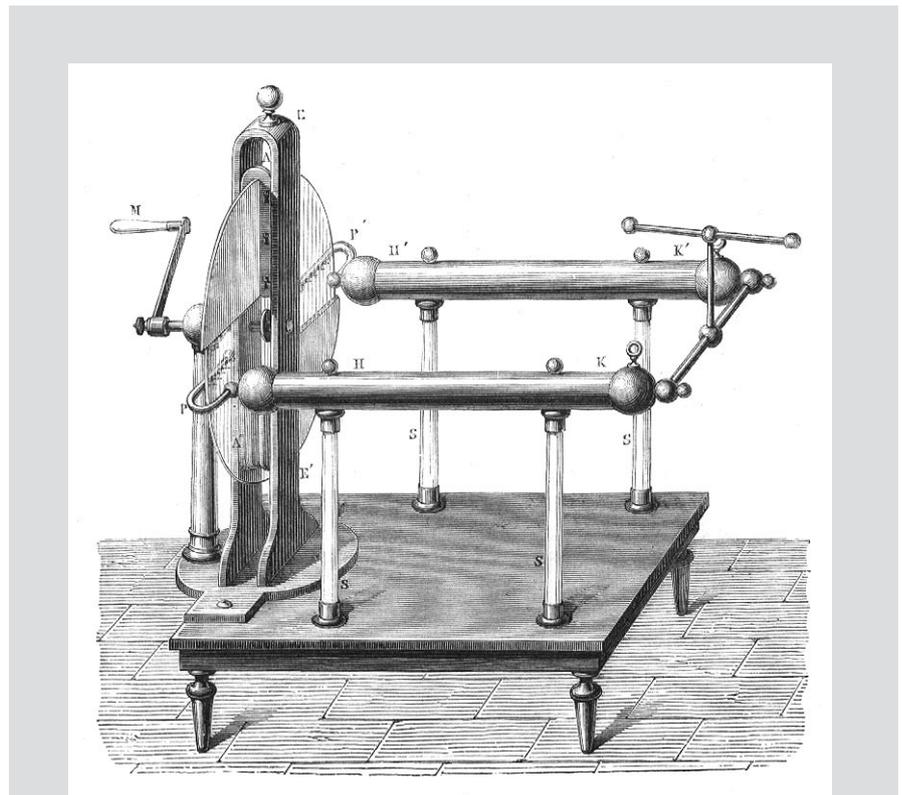
En toute rigueur, l'électron et les particules chargées ne peuvent être correctement décrits que dans le cadre quantique. Cependant, pour nous en tenir au sujet de cet article, on pourra se référer le plus souvent au seul schéma préquantique.

## Les différentes formes du courant électrique

Au niveau macroscopique, on peut donc distinguer différentes formes du courant électrique en fonction des phénomènes entraînant sa production mais aussi surtout en fonction du milieu dans lequel il se manifeste.

### 1. Emission dans le vide.

Il s'agit alors d'un flux de particules chargées, généralement d'électrons émis par exemple par une cathode chaude (loi d'émission de Richardson), accélérés par un champ électrostatique et se déplaçant à une vitesse qui est une fraction notable de celle de la lumière. La différence de potentiel d'accélération est alors de quelques milliers ou dizaines de milliers de volts. C'est le cas des rayons cathodiques des premières expériences et aussi du faisceau d'électrons des tubes d'oscilloscopes ou des tubes de télévision. Il s'agit donc d'un courant d'émission dont l'énergie véhiculée tient beaucoup moins au nombre de particules mises en jeu (en général très faible) qu'à leur vitesse élevée. La trajectoire de chaque particule est assimilable à un courant électrique élémentaire de telle sorte qu'il existe, en vertu des lois fondamentales de



**Figure 1.** La machine électrostatique de Ramsden. Elle produit de l'électricité par frottement continu de coussins sur un disque de verre. Elle fournit de très hautes tensions mais sous une faible intensité.

l'électrodynamique, une attraction entre ces courants de même sens qui contrebalance l'effet de répulsion électrostatique entre particules de même signe. Ainsi, on se trouve en présence de structures dynamiques pouvant être focalisées de façon stable sous forme de faisceaux de très faible diamètre.

### 2. Transport de charges superficielles dans le vide ou dans l'air sec.

C'est le cas des machines électrostatiques de Ramsden (**Figure 1**) ou de Wimshurst (transport sur disques isolants) et, aujourd'hui, des générateurs à haute tension de type Van de Graaf (transport sur courroies isolantes). Là aussi, le nombre de charges est très faible mais la vitesse de leur transport est, elle aussi, faible (quelques mètres par seconde) de telle sorte que les énergies mises en jeu sont également très faibles. Les générateurs électriques de ce type permettent donc, par exemple, d'élever un très petit nombre de charges à un haut potentiel, mais sous la forme d'un courant lui-même très faible. En ef-

fet, l'intensité du courant fourni par de tels générateurs est conditionnée par la nécessité du positionnement de charges, nécessairement surnuméraires et de même signe, qui se repoussent mutuellement et ne peuvent donc siéger qu'en surface des corps assurant leur transport, ce qui limite évidemment leur nombre de façon considérable.

Dans ces deux premiers cas, seule s'applique la loi  $I = Q/T$ , dans laquelle  $I$  est l'intensité du courant,  $Q$  la quantité d'électricité (fonction du passage à travers une section donnée du nombre de charges élémentaires mises en mouvement) et  $T$  le temps. Par contre, la loi d'Ohm ( $I = V/R$ ) ne s'applique pas car l'intensité du courant ne dépend en rien de la conductibilité électrique du milieu de circulation.

Il n'en va pas de même en ce qui concerne les courants circulant au sein de la matière condensée et, en particulier, dans les métaux.

Dans un tel cas, le nombre de charges mises en jeu (pour les métaux, des électrons libres) est in-

↳ comparablement plus élevé et peut dépasser largement, pour certains métaux bons conducteurs,  $10^{20}$  par centimètre cube (c'est-à-dire un électron libre par atome) car la charge que portent ces électrons demeure globalement neutralisée électriquement par celle, opposée, de l'ion atomique qui les a libérés, de telle sorte que l'ensemble du conducteur demeure toujours globalement neutre quel que soit le nombre de ses porteurs de charge. A la différence du cas précédent donc, la notion de conductibilité électrique, en relation avec le nombre de charges mobiles, prend toute son importance. C'est la raison pour laquelle, dans ce cas, on parle de courant de conduction pour lequel la loi d'Ohm s'applique : l'intensité du courant (I) circulant dans un conducteur est directement proportionnelle à la différence de potentiel appliquée entre ses extrémités (V) et inversement proportionnelle à sa résistance électrique (R).

### 3. Le courant de conduction.

Il s'agit donc du courant qui « circule » dans les milieux dits « conducteurs » qui, par opposition, permettent de définir des milieux dits « isolants ». La théorie de la conduction électrique dans les métaux et les milieux cristallins résulte des travaux d'un petit nombre de chercheurs : essentiellement Paul Karl Ludwig Drude, Ludwig Lorenz et surtout Félix Bloch ainsi qu'accessoirement, par exemple, Arnold Sommerfeld.

Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (les travaux de Drude remontent à 1900), la théorie de la conduction électrique dans les corps solides a toujours reposé sur l'idée que l'électricité était transportée par des particules chargées. Le problème posé était celui du nombre de ces particules chargées et de la nature des entraves apportées à leur déplacement par les structures physico-chimiques et leurs impuretés.

Au début du siècle, Drude a imaginé qu'un métal se compose d'ions lourds quasi immobiles et d'électrons qui se déplacent au hasard en se heurtant aux ions. Si un champ électrique est imposé de l'extérieur, les électrons sont accélérés entre deux collisions dans la direction opposée au champ (loi de Coulomb) et la vitesse moyenne de l'ensemble

## Encadré 2. Comportement des électrons dans un conducteur « parcouru » par un courant alternatif

A la lumière de ce qui est exposé dans l'encadré 1, on se rend compte que, dans un tel cas, il est difficile de parler de courant. Il s'agit plutôt d'une oscillation d'ensemble des électrons libres autour d'une configuration d'équilibre moyen. Quelle est la vitesse et surtout l'amplitude de ce mouvement d'oscillation ? Raisonnons par exemple en termes de densité de courant :

$$j = i / s$$

Le « courant » étant alternatif, de fréquence f, sa pulsation  $\omega$  est donnée par :

$$\omega = 2 \pi . f$$

Sa densité instantanée J sera :

$$J = J_{\max} \cdot \cos \omega . t$$

Et, en vertu de ce qui a été calculé dans l'encadré 1, la vitesse instantanée des électrons pourra s'écrire :

$$v = J_{\max} \cos \omega t / k . e$$

Un calcul guère plus compliqué donnerait la valeur de l'amplitude du mouvement :

$$A = J_{\max} / k . e . \omega$$

$$A = J_{\text{eff}} \sqrt{2} / k . e . \omega$$

Pour une valeur de J de 5 A/mm<sup>2</sup>, on aurait donc : A = 0,0833 / f mm.

Pour f = 50 hz, l'amplitude d'oscillation des électrons sera de 0,00166 mm. Elle est donc de l'ordre du micron.

Pour f = 1 Mhz, elle est évidemment vingt mille fois plus petite, c'est-à-dire qu'elle est inférieure à 1 Å. Il s'agit donc non pas d'un courant changeant de sens mais plutôt d'une vibration d'ensemble des électrons d'une amplitude comparable à celle la vibration des ions dans un réseau cristallin.

de ces électrons cesse d'être nulle (mais demeure toujours très faible) de telle sorte qu'ils font l'objet d'un entraînement global imposé par le champ. La densité du courant ainsi généré s'obtient en multipliant cette vitesse par le nombre d'électrons par unité de volume et par la charge e de l'électron. Elle est donc proportionnelle au champ, ce qui permet de retrouver la loi d'Ohm.

Il s'agit là évidemment d'une interprétation simple mais qui ne rend pas parfaitement compte de certains faits expérimentaux concernant, par exemple, les variations de résistivité en fonction de la température. Il a fallu attendre les années 20 pour que Félix Bloch, prix Nobel 1952, apporte une contribution fondamentale à la question en l'étudiant à la lumière de la mécanique quantique naissante. Il est apparu qu'il fallait distinguer certains groupes d'électrons libres et qu'il existait dans un réseau ionique de symétrie déterminée des

zones dites « de Brillouin », c'est-à-dire des zones d'énergie régissant la position des électrons. Ces notions ont surtout une importance en ce qui concerne les semi-conducteurs.

Une des conséquences les plus curieuses des travaux de Bloch tient à ce qu'il a fallu abandonner la notion de collision entre les électrons libres et les ions métalliques. En effet, Bloch a montré que dans un réseau cristallin parfait les électrons doivent se déplacer sans résistance. Le libre parcours moyen n'est donc pas limité par le choc des électrons sur les ions proprement dits mais par les interactions avec les impuretés et surtout avec les nombreux défauts des réseaux cristallins des métaux, lesquels se présentent souvent plutôt comme des mosaïques de microcristaux d'orientations diverses que comme des monocristaux. Il s'agit là d'un résultat étonnant et malheureusement mal connu. Yves Rocard, par exemple, dans son excellent livre

sur l'électricité publié en 1951 chez Masson, l'ignore totalement.

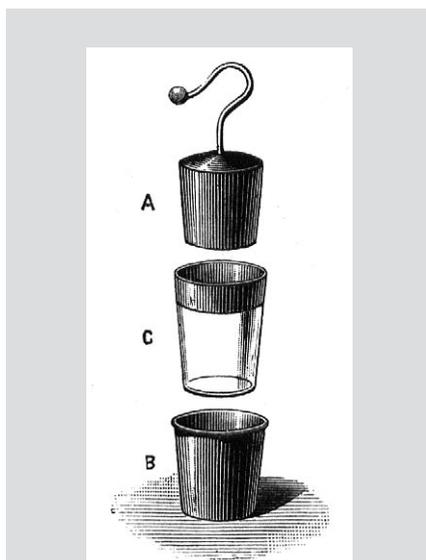
C'est donc l'un des faits d'apparence paradoxale qui caractérisent l'électricité. Il en existe beaucoup d'autres, en particulier en ce qui concerne le comportement des diélectriques et par conséquent des condensateurs.

#### 4. Le courant de déplacement dans les diélectriques.

Durant la charge ou la décharge d'un condensateur à diélectrique matériel, il se produit d'importants déplacements de charges élémentaires dans ce diélectrique qui peuvent être considérés comme des courants électriques. Cette interprétation, cependant, se trouve en défaut si le diélectrique est le vide.

Il existe une expérience, oubliée de nos jours, qui caractérisait les diélectriques : celle de la bouteille de Leyde démontable (**Figure 2**). Elle montre le rôle primordial que joue le diélectrique dans un condensateur car c'est au sein de ce diélectrique qu'est localisée l'énergie emmagasinée par l'appareil.

Il est dommage aussi que l'on ait rangé aux oubliettes le matériel de démonstration des propriétés de ces condensateurs comme, par exemple, l'électroscope condensateur de Volta. En effet, on définissait comme une propriété importante de l'électricité le phénomène dit de « condensation » (d'où le terme de condensateur) dont on démontrait l'existence grâce à un appareil à électrodes mobiles qui pouvaient être rapprochées à volonté. Une source de tension reliée à ces électrodes établit entre elles une différence de potentiel constante  $V$  pendant qu'on les rapproche. Le champ, de l'ordre de grandeur de  $V/d$  où  $d$  est la distance entre les électrodes, croît de ce fait de telle sorte qu'en vertu de la loi de Coulomb le nombre de charges sur les électrodes croît en proportion. Il se manifeste donc plus d'électricité sur les armatures bien qu'elles soient soumises à la même différence de potentiel. C'est en cela que résidait le phénomène de condensation de l'électricité. Lorsqu'il a été chargé par un courant continu, le condensateur conserve donc sa charge et l'état de son diélectrique est tel que le milieu ainsi traité a induit des charges surnuméraires à la surface des électrodes en regard,



**Figure 2. La bouteille à armatures mobiles de Franklin. C'est une bouteille de Leyde que l'on peut démonter en séparant le vase de verre qui joue le rôle de diélectrique de ses électrodes métalliques interne et externe. On charge la bouteille, on la démonte puis on la remonte après avoir déchargé à la terre les deux électrodes. On constate que la bouteille ainsi traitée a conservé sa charge dont l'énergie était donc stockée dans le diélectrique.**

negatives d'un côté et positives de l'autre. Le condensateur se conduit alors comme un générateur de courant électrique dont la force électromotrice est la différence de potentiel existant entre ses électrodes.

Il suffit alors de relier les électrodes par un fil conducteur pour que, et cela en vertu d'une règle fondamentale de l'électrocinétique selon laquelle le courant a la même intensité en tout point d'un circuit fermé, circule un courant dans ce circuit extérieur, bien sûr, mais aussi, et avec la même intensité, à l'intérieur du condensateur considéré comme générateur, c'est-à-dire au sein de son diélectrique qui est pourtant un isolant de très grande résistivité.

Si la capacité du condensateur est élevée (des centaines de microfarads par exemple, ce qui est maintenant facilement réalisable) et si la résistance électrique extérieure est faible, il est possible d'obtenir ainsi durant une notable fraction de seconde

un courant de plusieurs centaines d'ampères qui nécessairement traverse aussi le diélectrique.

Nous sommes en présence là d'un paradoxe remarquable. Pourtant, il doit bien s'agir de l'équivalent d'un courant traversant le diélectrique car, dans un tel cas, un calcul élémentaire montre que la résistance électrique interne du condensateur considéré comme générateur est très faible, plus faible même que le serait celle d'un générateur électrodynamique de même dimension comportant des circuits en cuivre.

Par l'artifice de la charge du condensateur, on a donc transformé de façon transitoire un bon isolant en un milieu actif renouvelant en permanence la charge électrique des électrodes par on ne sait pas très bien quel mécanisme.

Diverses théories ont été proposées pour l'expliquer depuis celle, applicable au vide, avancée par Maxwell et définissant par le calcul un vecteur « déplacement électrique » tel que :

$$D = \frac{e E}{4\pi}$$

où  $e$  est le pouvoir inducteur spécifique et  $E$  le champ.

Si le diélectrique est le vide, il est évident que le courant de déplacement :

$$I = \frac{1}{4\pi} \frac{dE}{dt}$$

ne correspond à aucun mouvement de charges. Il faudrait alors en conclure que les propriétés de l'espace sont modifiées car il y existe, en particulier, un champ magnétique transitoire puisque ce courant de déplacement doit être considéré comme équivalent à un courant de conduction.

On se trouve donc dans le cas très embarrassant d'un courant électrique sans déplacement de charges.

Nous ne reprendrons pas ici la théorie des diélectriques matériels ou non, la totalité de ce numéro n'y suffirait pas et le paradoxe ne serait en rien évacué. Il demeure donc bien actuel.

En électrodynamique, divers autres problèmes demeurent ouverts. Nous n'en évoquerons que quelques-uns.

Un problème majeur est celui de la relation mécanique existant entre

le flux de charges, le courant électrique circulant dans un conducteur et la matière même de ce conducteur. Autrement dit, par quel genre d'action mécanique le mouvement imposé au courant par l'induction électrique répondant à la loi de Laplace, par exemple, se transmet-il au support de ce courant, c'est-à-dire le conducteur. A la vérité, nous n'en savons pas grand-chose.

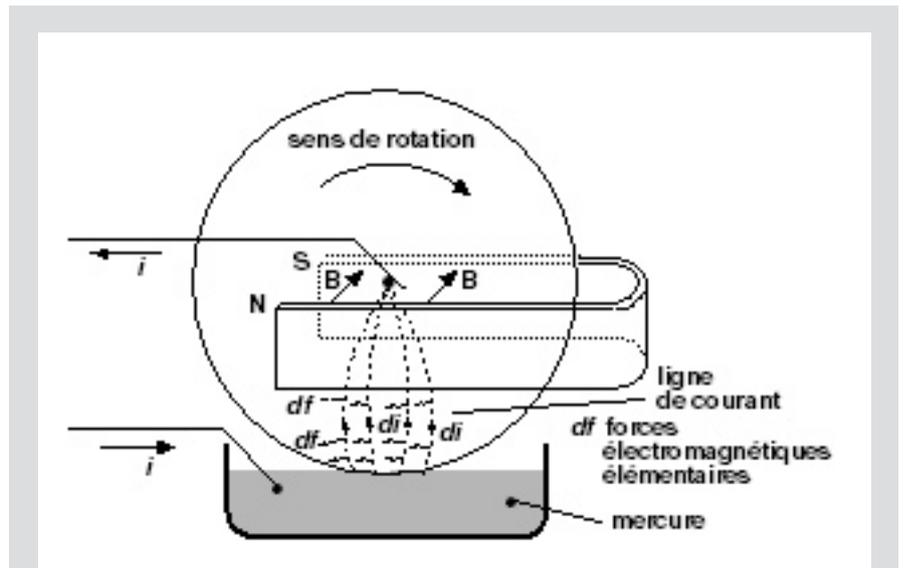
Si l'on en croit la théorie de Bloch, un tel couplage mécanique ne se manifesterait que grâce à la présence d'impuretés et surtout grâce à l'existence de défauts de réseau du métal constituant le conducteur (de telle sorte qu'on ne voit pas très bien ce qui se passerait si ce conducteur était un monocristal sans défaut).

En effet, diverses expériences montrent que l'action électromotrice, dans le cas des métaux industriels, paraît s'appliquer au conducteur même, comme celle de la roue de Barlow (**Figure 3**).

D'autres expériences, par contre, mettent en évidence un certain découplage mécanique entre le courant et le matériau lui servant de support. C'est, par exemple, l'expérience de Tollman et Stewart. Une bobine à grand nombre de spires est mise en mouvement de rotation rapide autour de son axe, puis sa rotation est brusquement arrêtée. Il apparaît alors une tension électrique transitoire à ses bornes qui dénote ainsi la circulation d'un flux d'électrons libres entraînés par inertie.

Il semble donc que si l'on connaît de manière satisfaisante les lois d'interaction globale entre courants, on connaît par contre moins bien les phénomènes intervenant au sein même des conducteurs dans lesquels ils circulent.

Un courant électrique macroscopique circulant au sein d'un fil conducteur peut être considéré comme constitué par un très grand nombre de microcourants parallèles et de même sens qui doivent interagir. Si les lois macroscopiques de l'électrodynamique leur sont applicables, cette interaction doit prendre la forme d'une attraction limitée seulement par la répulsion électrostatique entre charges de même signe des différents microcourants, et cela d'une manière comparable à ce qui se passe pour un flux d'électrons dans le vide.



**Figure 3.** Le disque de Faraday dont le frotteur externe est remplacé par un bain de mercure dans l'expérience de la roue de Barlow. Leur fonctionnement montre la solidarité mécanique existant entre le courant d'électrons et le métal dans lequel il circule.

Le problème est de savoir si un tel mécanisme a un retentissement sur la matière ionisée du conducteur de manière à pouvoir être mis en évidence expérimentalement à l'échelle macroscopique.

En fait, ce problème a été en partie résolu par l'observation de l'« effet de pincement » – le « *pinch effect* » des Anglo-Saxons – affectant les conducteurs de métal liquide, décrit par Carl Hering à propos du fonctionnement erratique des fours électriques à résistance. J'ai analysé ce phénomène dans mon article du n°55 de *Fusion* de mars-avril 1995 sur la force longitudinale d'Ampère.

L'attraction entre microcourants a donc une traduction au niveau du conducteur entier et il en est de même en ce qui concerne la force longitudinale d'Ampère régnant entre éléments successifs de courant. Lorsque l'on provoque le passage d'un courant très intense (de l'ordre d'une centaine de milliers d'ampères en transitoires de quelques millisecondes) au sein d'un conducteur d'une section de l'ordre du millimètre carré, on provoque la fragmentation de celui-ci en éléments longitudinaux se produisant avant la survenue de toute manifestation d'ordre thermique. On se trouve alors dans les conditions correspondant au fameux mètre par seconde du chroniqueur cité en

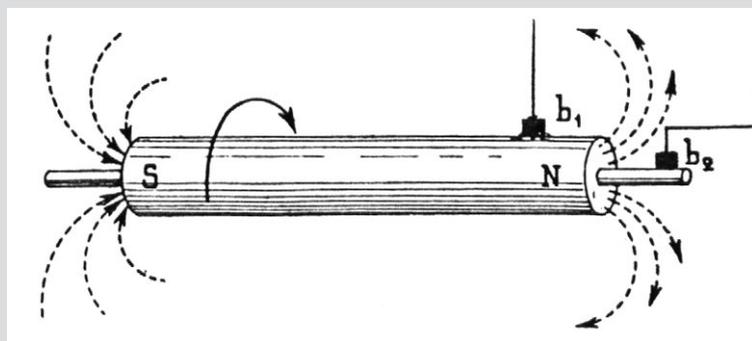
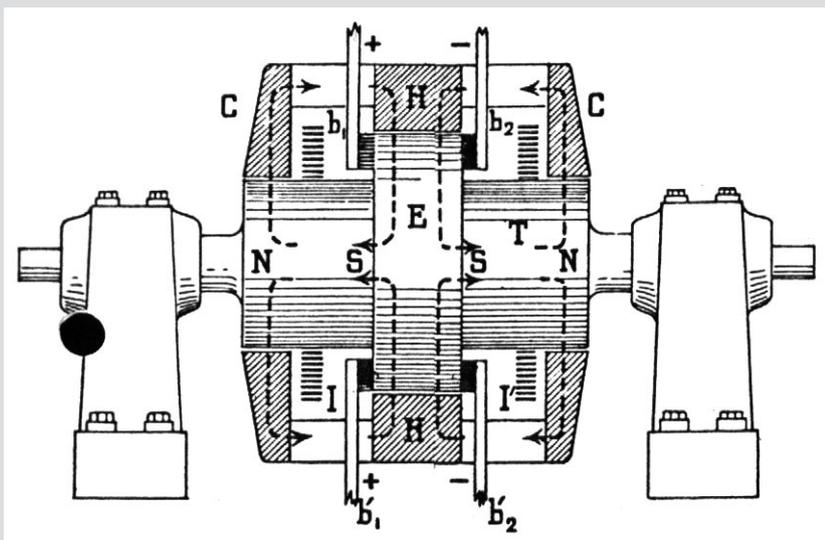
introduction, à cette différence près qu'il s'agit seulement d'impulsions ne dépassant pas le dix millième de seconde.

Ce sont là des conditions extrêmes mettant en jeu des forces d'intensité considérable.

J'ai montré que l'on pouvait mettre en évidence les forces de ce genre, mais notablement plus faibles, pour des courants de l'ordre de quelques ampères, afin d'en effectuer la mesure précise. Et, comme je l'ai indiqué dans l'article de *Fusion* de mai-juin 2000, ce sont ces expériences qui de surcroît m'ont amené à envisager l'existence d'un effet gravitationnel du courant électrique.

L'expérience de Tollman et Stewart pouvait conduire à poser le problème du « poids de l'électricité ». Le poids d'un corps augmente-t-il lorsqu'on lui communique une charge électrique ? Yves Rocard a apporté une réponse théorique à cette question. Il a montré par le calcul que dans le cas d'une feuille d'or battu d'une surface de 1 m<sup>2</sup> pesant 1 g et chargée négativement au maximum possible, l'augmentation de poids est de l'ordre de 10<sup>-13</sup> g. Elle est donc infime.

Il en est de même de l'énergie purement cinétique des électrons de conduction circulant dans un métal, et cela pour répondre aux arguments de certains des lecteurs de mon précédent article. Etant



**Figure 4.** Une génératrice homopolaire acyclique. Elle dérive directement du disque de Faraday. Elle est utilisée pour produire des courants très intenses pouvant atteindre 100 000 A puisque, à la différence des dynamos (à courant continu) classiques, elle ne comporte pas de collecteur à lames. Par contre, sa force électromotrice ne peut dépasser quelques volts.

de poids à la fermeture du circuit. Même la circulation dans un tel circuit bouclé de courants très intenses, de plusieurs milliers d'ampères, ne provoque aucune variation de poids mesurable si toutes les précautions sont prises pour éliminer les erreurs de mesure.

Le problème de l'action du courant dans les diélectrique de condensateurs cependant restait posé, et un certain nombre de chercheurs ont poursuivi des travaux plus ou moins bien menés tendant à montrer que la charge d'un condensateur en modifie le poids. Curieusement, l'effort de ces « francs-tireurs » s'est focalisé sur les hautes tensions de charge ne mettant en jeu que des courants faibles, ce qui provoque des artefacts particulièrement gênants du fait des efforts purement électrostatiques mis en œuvre. Il paraît cependant que même dans d'aussi mauvaises conditions un authentique effet gravifique se manifeste qui serait sans doute plus évident si des courants intenses étaient utilisés.

Il semble donc qu'en matière d'électrogravitation – si électrogravitation il y a – celle-ci ne saurait se manifester dans les conditions de symétrie axiale qui sont le fait des circuits « bouclés ».

Seule une rupture de cette symétrie comme celle existant dans mes expériences, ou comme celle existant par nature dans les condensateurs, permettrait de la mettre en évidence et de l'étudier. ■

donné leur faible masse et surtout leur très faible vitesse d'ensemble, leur flux pour des courants de quelques ampères ne peut jouer aucun rôle purement mécanique décelable par les moyens usuels, balances ou dynamomètres.

La perturbation gravitationnelle que j'ai observée et qui, pour des courants de l'ordre de 10 A, met en jeu des milligrammes, est donc un tout autre phénomène qui ne répond pas aux mécanismes décrits jusqu'ici et qui se manifeste dans des conditions bien particulières de dissymétrie de la circulation du courant, de telle sorte qu'il est loisible de penser qu'il s'agit, de la même manière que pour les diélectriques de condensateur, d'une modification transitoire des propriétés de l'espace, et donc d'un authentique

effet électrogravifique.

Ce comportement paradoxal du diélectrique des condensateurs a intrigué nombre de physiciens et d'ingénieurs comme par exemple Ducretet, Helmholtz, Lorentz, surtout à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. La plupart, cependant, et probablement les plus sérieux, se heurtant à de trop grandes difficultés expérimentales à propos de la dégravitation apparente de disques diélectriques chargés à très haute tension par des machines électrostatiques, ont abandonné toute recherche sur les effets gravitationnels de l'électricité, par ailleurs en trop grand décalage avec les canons en vigueur.

Et puis, n'était-il pas avéré qu'un ensemble générateur-récepteur électrique placé sur le plateau d'une balance ne présente aucune variation

### Bibliographie

- F. de Poncharra, *Théorie électronique du courant électrique*, Dunod, 1940.
- J. Granier, *Les Diélectriques*, Dunod, 1948.
- Y. Rocard, *Electricité*, Masson, 1951.
- C. J. F. Bottcher, *Theory of electric polarisation*, Elsevier, 1952.
- E. Durand, *Electrostatique et Magnéto-statique*, Masson, 1953.
- R. H. Bube, *Electrons in solids*, Acad. Press New York, 1988.
- R. Saumont, « La force longitudinale d'Ampère », *Fusion*, n° 55, mars-avril 1995.
- A. Szames, *L'effet Biefeld Brown : histoire secrète de l'antigravité*, Alexandre Szames, Boulogne, 1998.
- R. Saumont, « L'antigravitation », *Fusion*, n° 81, mai-juin 2000.