

A PROPOS DES EXPÉRIENCES DE M. CRÉMIEU

La *Revue* a rendu compte des récentes expériences de M. Crémieu¹, qui, si elles étaient confirmées par des recherches ultérieures, bouleverseraient complètement nos idées sur l'Électrodynamique.

Pour faire comprendre à quel point les idées de Crémieu sont révolutionnaires, il est nécessaire d'abord de résumer succinctement toute l'histoire de l'Électrodynamique et de remonter aux origines, c'est-à-dire à Ampère.

Je suivrai dans cette exposition un ordre *logique*, qui ne sera pas absolument d'accord avec l'ordre historique.

I. — THÉORIE D'AMPÈRE.

Quand Ampère a étudié expérimentalement les actions mutuelles des courants, il n'a opéré et il ne pouvait opérer que sur des courants fermés.

Ce n'est pas qu'il niât la possibilité des courants ouverts. Si deux conducteurs sont chargés d'électricité de nom contraire et si on les met en communication par un fil, il s'établit un courant allant de l'un à l'autre et qui dure jusqu'à ce que les deux potentiels soient devenus égaux. Dans les idées qui régnaient du temps d'Ampère, c'était là un courant ouvert; on voyait bien le courant aller du premier conducteur au second, on ne le voyait pas revenir du second au premier.

Ainsi, Ampère considérait comme ouverts les courants de cette nature, par exemple les courants de décharge des condensateurs; mais il ne pouvait en faire l'objet de ses expériences, parce que la durée en est trop courte.

On peut imaginer aussi une autre sorte de courant ouvert. Je suppose deux conducteurs, A et B, reliés par un fil AMB. De petites masses conductrices en mouvement se mettent d'abord en contact avec le conducteur B, lui empruntent une charge électrique, quittent le contact de B, se mettent en mouvement en suivant le chemin BNA, et, en transportant avec elles leur charge, viennent au contact de A et lui abandonnent leur charge, qui revient ensuite en B en suivant le fil AMB.

On a bien là en un sens un circuit fermé, puisque l'électricité décrit le circuit fermé BNAMB; mais les deux parties de ce courant sont très différentes: dans le fil AMB, l'électricité se déplace à travers un conducteur fixe, à la façon d'un

courant voltaïque, en surmontant une résistance ohmique et en développant de la chaleur; on dit qu'elle se déplace *par conduction*; dans la partie BNA, l'électricité est *transportée* par un conducteur mobile; on dit qu'elle se déplace *par convection*.

Si, alors, le courant de convection est considéré comme tout à fait analogue au courant de conduction, le circuit BNAMB est fermé; si, au contraire, le courant de convection n'est pas « un vrai courant », et, par exemple, n'agit pas sur les aimants, il ne reste plus que le courant de conduction AMB, qui est *ouvert*.

Par exemple, si l'on réunit par un fil les deux pôles d'une machine de Holtz, le plateau tournant chargé transporte d'un pôle à l'autre par convection de l'électricité, qui revient au premier pôle par conduction à travers le fil.

Mais des courants de cette espèce sont très difficiles à réaliser avec une intensité appréciable. Avec les moyens dont disposait Ampère, on peut dire que c'était impossible.

En résumé, Ampère pouvait concevoir l'existence de deux espèces de courants ouverts, mais il ne pouvait opérer ni sur les uns ni sur les autres, parce qu'ils étaient trop peu intenses ou parce qu'ils duraient trop peu de temps.

L'expérience ne pouvait donc lui montrer que l'action d'un courant fermé sur un courant fermé, ou à, la rigueur, l'action d'un courant fermé sur une portion de courant, parce qu'on peut faire parcourir à un courant un circuit *fermé* composé d'une partie mobile et d'une partie fixe. On peut alors étudier les déplacements de la partie mobile sous l'action d'un autre courant fermé.

En revanche, Ampère n'avait aucun moyen d'étudier l'action d'un courant ouvert, soit sur un courant fermé, soit sur un autre courant ouvert.

1. *Cas des courants fermés.* — Dans le cas de l'action mutuelle de deux courants fermés, l'expérience révéla à Ampère des lois remarquablement simples.

Je rappelle rapidement ici celles qui nous seront utiles dans la suite :

1° Si l'intensité des courants est maintenue constante, et si les deux circuits, après avoir subi des déplacements et des déformations quelconques, reviennent finalement à leurs positions initiales, le travail total des actions électrodynamiques sera nul.

En d'autres termes, il y a un *potentiel électro-*

¹ Voyez à ce sujet la *Revue* du 15 novembre 1901, t. XII, p. 981.

dynamique des deux circuits proportionnel au produit des intensités et dépendant de la forme et de la position relative des circuits; le travail des actions électrodynamiques est égal à la variation de ce potentiel;

2° L'action d'un solénoïde fermé est nulle;

3° L'action d'un circuit C sur un autre circuit voltaïque C' ne dépend que du « champ magnétique » développé par ce circuit C. En chaque point de l'espace, on peut, en effet, définir en grandeur et direction une certaine force appelée *force magnétique* et qui jouit des propriétés suivantes :

a) La force exercée par C sur un pôle magnétique est appliquée à ce pôle; elle est égale à la force magnétique multipliée par la masse magnétique du pôle;

b) Une aiguille aimantée très courte tend à prendre la direction de la force magnétique, et le couple qui tend à l'y ramener est proportionnel au produit de la force magnétique, du moment magnétique de l'aiguille et du sinus de l'angle d'écart;

c) Si le circuit C' se déplace, le travail de l'action électrodynamique exercée par C sur C' sera égal à l'accroissement du « flux de force magnétique » qui traverse ce circuit.

2. *Action d'un courant fermé sur une portion de courant.* — Supposons que le circuit C' se compose de deux parties, l'une fixe, l'autre mobile; sur la figure 1, la partie fixe sera représentée, par exemple,

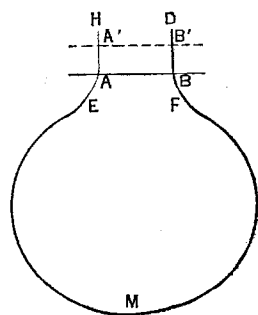


Fig. 1.

par la ligne DBFMEA, tandis que la partie mobile AB se déplacera de façon que ses deux extrémités A et B glissent en s'appuyant sur les deux fils EAH et FBD.

Si un semblable circuit est soumis à l'action d'un courant fermé C, la partie mobile se déplacera comme si elle subissait l'action d'une force. Ampère *admet* que la force

apparente à laquelle cette partie mobile AB semble ainsi soumise, représentant l'action de C sur la portion AB du courant, est la même que si AB était parcouru par un courant ouvert qui s'arrêterait en A et en B, au lieu de l'être par un courant fermé qui, après être arrivé en B, revient en A par le chemin BFMEA à travers la partie fixe du circuit.

Cette hypothèse peut sembler assez naturelle; néanmoins, *elle ne s'impose pas*, puisque nous verrons plus tard que Helmholtz l'a rejetée. Quoi qu'il en soit, elle permet à Ampère, bien qu'il n'ait

pu jamais réaliser un courant ouvert, d'énoncer les lois de l'action d'un courant fermé sur un courant ouvert, ou même sur un élément de courant.

Les lois restent simples :

1° La force qui agit sur un élément de courant est appliquée à cet élément; elle est normale à l'élément et à la force magnétique et proportionnelle à la composante de cette force magnétique qui est normale à l'élément;

2° L'action d'un solénoïde fermé sur un élément de courant reste nulle.

Mais il n'y a plus de potentiel électrodynamique, c'est-à-dire que, quand un courant fermé et un courant ouvert, dont les intensités ont été maintenues constantes, reviennent à leurs positions initiales, le travail total n'est pas nul.

3. *Rotations continues.* — Parmi les expériences électrodynamiques, les plus curieuses sont celles où l'on a pu réaliser des rotations continues et qu'on appelle quelquefois expériences d'*induction unipolaire*. Un aimant peut tourner autour de son axe; un courant parcourt d'abord un fil fixe, entre dans l'aimant par le pôle N par exemple, parcourt la moitié de l'aimant, en sort par un contact glissant et rentre dans le fil fixe.

L'aimant entre alors en rotation continue sans pouvoir jamais atteindre une position d'équilibre. C'est l'expérience de Faraday.

Comment cela est-il possible? Si l'on avait affaire à deux circuits de forme invariable, l'un fixe C, l'autre C' mobile autour d'un axe, ce dernier ne pourrait jamais prendre de rotation continue; en effet, il existe un potentiel électrodynamique; il y aura donc forcément une position d'équilibre, ce sera celle où ce potentiel sera maximum.

Les rotations continues ne sont donc possibles que si le circuit C' se compose de deux parties : l'une fixe, l'autre mobile autour d'un axe, comme cela a lieu dans l'expérience de Faraday. Encore convient-il de faire une distinction. Le passage de la partie fixe à la partie mobile ou inversement peut se faire, soit par un contact simple (le même point de la partie mobile restant constamment en contact avec le même point de la partie fixe), soit par un contact glissant (le même point de la partie mobile venant successivement en contact avec divers points de la partie fixe).

C'est seulement dans le second cas qu'il peut y avoir rotation continue. Voici ce qui arrive alors : le système tend bien à prendre une position d'équilibre; mais, quand elle va être atteinte, le contact glissant met la partie mobile en communication avec un nouveau point de la partie fixe; elle change les connexions, elle change donc les conditions d'équilibre, de sorte que, la position d'é-

équilibre fuyant, pour ainsi dire, devant le système qui cherche à l'atteindre, la rotation peut se poursuivre indéfiniment.

Ampère admet que l'action du circuit sur la partie mobile de C' est la même que si la partie fixe de C' n'existait pas et si, par conséquent, le courant qui circule dans la partie mobile était ouvert.

Il conclut donc que l'action d'un courant fermé sur un courant ouvert, ou inversement celle d'un courant ouvert sur un courant fermé, peut donner lieu à une rotation continue.

Mais cette conclusion dépend de l'hypothèse que je viens d'énoncer et qui, ainsi que je l'ai dit plus haut, n'est pas admise par Helmholtz.

On peut se rendre compte d'une autre manière des rotations continues qui doivent se produire dans la théorie d'Ampère.

Envisageons l'action mutuelle d'un aimant rectiligne et d'un élément de courant E. Cette force mutuelle sera appliquée à l'élément E et non pas sur l'axe de l'aimant; son moment par rapport à cet axe ne sera donc pas nul. Si, en particulier, l'aimant est indéfini dans un sens, de telle façon que, l'un des pôles étant très éloigné, l'action de l'aimant se réduise à celle de l'autre pôle, nous pourrions dire que la force mutuelle qui s'exerce entre un pôle magnétique et un élément de courant n'est pas appliquée au pôle, mais à l'élément.

Si, au lieu d'un élément isolé, nous avons affaire à un courant fermé, l'action du courant fermé serait la résultante des actions de ses divers éléments. Chacune des composantes serait appliquée à l'élément correspondant, mais la résultante serait appliquée au pôle, de sorte que son moment par rapport à l'axe de l'aimant serait nul.

4. *Action mutuelle de deux courants ouverts.* — En ce qui concerne l'action mutuelle de deux courants ouverts et, en particulier, celle de deux éléments de courant, toute expérience fait défaut. Ampère a recours à l'hypothèse. Il suppose : 1° que l'action mutuelle de deux éléments se réduit à une force dirigée suivant la droite qui les joint; 2° que l'action de deux courants fermés est la résultante des actions mutuelles de leurs divers éléments, lesquelles sont, d'ailleurs, les mêmes que si ces éléments étaient isolés.

Ce qui est remarquable, c'est qu'Ampère fait ces deux hypothèses sans s'en apercevoir, puisque, par une singulière illusion, il intitule son immortel ouvrage : *Théorie des phénomènes électrodynamiques, uniquement fondée sur l'expérience.*

Quoi qu'il en soit, ces deux hypothèses, jointes aux expériences sur les courants fermés, suffisent pour déterminer complètement la loi de l'action mutuelle de deux éléments.

Mais alors, la plupart des lois simples que nous avons rencontrées dans le cas des courants fermés ne sont plus vraies.

D'abord, il n'y a pas de potentiel électrodynamique; il n'y en avait d'ailleurs pas non plus, comme nous l'avons vu, dans le cas d'un courant fermé agissant sur un courant ouvert.

Ensuite, il n'y a plus, à proprement parler, de force magnétique.

Et, en effet, nous avons donné plus haut de cette force trois définitions différentes :

1° Par l'action subie par un pôle magnétique;

2° Par le couple directeur qui oriente l'aiguille aimantée;

3° Par l'action subie par un élément de courant.

Or, dans le cas qui nous occupe maintenant, non seulement ces trois définitions ne concordent plus, mais chacune d'elles est dépourvue de sens, et en effet :

1° Un pôle magnétique n'est plus simplement soumis à une force unique appliquée à ce pôle. Nous avons vu, en effet, que la force due à l'action d'un élément de courant sur un pôle n'est pas appliquée au pôle, mais à l'élément; elle peut, d'ailleurs, être remplacée par une force appliquée au pôle et par un couple;

2° Le couple qui agit sur l'aiguille aimantée n'est plus un simple couple directeur; car son moment par rapport à l'axe de l'aiguille n'est pas nul. Il se décompose en un couple directeur proprement dit et un couple supplémentaire qui tend à produire la rotation continue dont j'ai parlé plus haut;

3° Enfin, la force subie par un élément de courant n'est pas normale à cet élément.

En d'autres termes, *l'unité de la force magnétique a disparu.*

Voici en quoi consiste cette unité. Deux systèmes qui exercent la même action sur un pôle magnétique, exerceront aussi la même action sur une aiguille aimantée infiniment petite, ou sur un élément de courant, placés au même point de l'espace où était ce pôle.

Eh bien, cela est vrai si ces deux systèmes ne contiennent que des courants fermés; cela ne serait plus vrai, d'après Ampère, si ces systèmes contenaient des courants ouverts.

Il suffit de remarquer, par exemple, que, si un pôle magnétique est placé en A et un élément en B, la direction de l'élément étant sur le prolongement de la droite AB, cet élément, qui n'exercera aucune action sur ce pôle, en exercera une, au contraire, soit sur une aiguille aimantée placée au point A, soit sur un élément de courant placé au point A.

5. *Induction.* — On sait que la découverte de

l'induction électrodynamique ne tarda pas à suivre les immortels travaux d'Ampère.

Tant qu'il ne s'agit que de courants fermés, il n'y a aucune difficulté, et Helmholtz a même remarqué que le principe de la conservation de l'énergie pouvait suffire pour déduire les lois de l'induction des lois électrodynamiques d'Ampère.

Le même principe permet encore cette déduction dans le cas des courants ouverts, quoique, bien entendu, on ne puisse soumettre le résultat au contrôle de l'expérience, puisque l'on ne peut réaliser de pareils courants.

Si l'on veut appliquer ce mode d'analyse à la théorie d'Ampère sur les courants ouverts, on arrive à des résultats bien faits pour nous surprendre.

D'abord, l'induction ne peut se déduire de la variation du champ magnétique d'après la formule bien connue des savants et des praticiens, et en effet, comme nous l'avons dit, il n'y a plus à proprement parler de champ magnétique.

Mais il y a plus. Si un circuit C est soumis à l'induction d'un système voltaïque variable S; si ce système S se déplace et se déforme d'une manière quelconque, que l'intensité des courants de ce système varie suivant une loi quelconque, mais qu'après ces variations, le système revienne finalement à sa situation initiale, il semble naturel de supposer que la force électromotrice *moyenne* induite dans le circuit C est nulle.

Cela est vrai si le circuit C est fermé et si le système S ne renferme que des courants fermés. Cela ne serait plus vrai, si l'on accepte la théorie d'Ampère, dès qu'il y aurait des courants ouverts. De sorte que, non seulement l'induction ne sera plus la variation du flux de force magnétique dans aucun des sens habituels de ce mot, mais elle ne pourra pas être représentée par la variation de quoi que ce soit.

II. — THÉORIE DE HELMHOLTZ.

J'ai insisté sur les conséquences de la théorie d'Ampère et de sa façon de comprendre l'action des courants ouverts.

Il est difficile de méconnaître le caractère paradoxal et artificiel des propositions auxquelles on est ainsi conduit; on est amené à penser que « ça ne doit pas être ça ».

On conçoit donc que Helmholtz ait été amené à chercher autre chose.

Helmholtz rejette l'hypothèse fondamentale d'Ampère, à savoir que l'action mutuelle de deux éléments de courant se ramène à une force dirigée suivant la droite qui les joint.

Il admet qu'un élément de courant n'est pas soumis à une force unique, mais à une force et à un

couple. C'est même ce qui a donné lieu à la polémique célèbre de Bertrand et d'Helmholtz.

Helmholtz remplace l'hypothèse d'Ampère par la suivante : deux éléments de courant admettent toujours un potentiel électrodynamique, dépendant uniquement de leur position et de leur orientation, et le travail des forces qu'ils exercent l'un sur l'autre est égal à la variation de ce potentiel.

Dans le cas des courants fermés, seul accessible à l'expérience, les deux théories concordent; dans tous les autres cas, elles diffèrent.

D'abord, contrairement à ce que supposait Ampère, la force à laquelle semble soumise la portion mobile d'un courant fermé n'est pas la même que cette portion mobile subirait si elle était isolée et constituait un courant ouvert.

Revenons à la figure 1; dans la seule expérience réalisable, la portion mobile AB n'est pas isolée, mais fait partie d'un circuit fermé ABFMEA. Quand elle vient en A'B', le potentiel électrodynamique total varie pour deux raisons : 1° il subit un premier accroissement parce que le potentiel de A'B' par rapport au circuit C n'est pas le même que celui de AB; 2° il subit un second accroissement, parce qu'il faut l'augmenter des potentiels des éléments AA' et B'B par rapport à C.

C'est ce *double* accroissement qui représente le travail de la force à laquelle la portion AB semble soumise.

Si, au contraire, AB était isolée, le potentiel ne subirait que le premier accroissement, et c'est ce premier accroissement seulement qui mesurerait le travail de la force qui agit sur AB.

En second lieu, il ne peut pas y avoir de rotation continue sans contact glissant; et, en effet, c'est là, comme nous l'avons vu à propos des courants fermés, une conséquence immédiate de l'existence d'un potentiel électrodynamique.

Dans l'expérience de Faraday, si l'aimant est fixe et si la partie du courant extérieure à l'aimant parcourt un fil mobile, cette partie mobile pourra subir une rotation continue. Mais cela ne veut pas dire que si, l'on supprimait les contacts du fil avec l'aimant et qu'on fit parcourir le fil par un courant *ouvert*, le fil prendrait encore un mouvement de rotation continue.

Je viens de dire, en effet, qu'un élément *isolé* ne subit pas la même action qu'un élément mobile faisant partie d'un circuit fermé.

Autre différence : L'action d'un solénoïde fermé sur un courant fermé est nulle d'après l'expérience et d'après les deux théories; son action sur un courant ouvert serait nulle d'après Ampère; elle ne serait pas nulle d'après Helmholtz.

D'où une conséquence importante. Nous avons donné plus haut trois définitions de la force magné-

tique; la troisième n'a ici aucun sens puisqu'un élément de courant n'est plus soumis à une force unique. La première n'en a pas non plus. Qu'est-ce, en effet, qu'un pôle magnétique? C'est l'extrémité d'un aimant linéaire indéfini. Cet aimant peut être remplacé par un solénoïde indéfini. Pour que la définition de la force magnétique eût un sens, il faudrait que l'action exercée par un courant ouvert sur un solénoïde indéfini ne dépendît que de la position de l'extrémité de ce solénoïde, c'est-à-dire que l'action sur un solénoïde fermé fût nulle. Or, nous venons de voir que ce n'était pas vrai.

En revanche, rien n'empêche d'adopter la deuxième définition, celle qui est fondée sur la mesure du couple directeur qui tend à orienter une aiguille aimantée.

Mais, si on l'adopte, ni les effets d'induction ni les effets électrodynamiques ne dépendront uniquement de la distribution des lignes de force de ce champ magnétique.

III. — DIFFICULTÉS SOULEVÉES PAR CES THÉORIES.

La théorie de Helmholtz est un progrès sur celle d'Ampère; il s'en faut cependant que toutes les difficultés soient aplanies. Dans l'une comme dans l'autre, le mot de champ magnétique n'a pas de sens, ou, si on lui en donne un par une convention plus ou moins artificielle, les lois ordinaires, si familières à tous les électriciens, ne s'appliquent plus; c'est ainsi que la force électromotrice induite dans un fil n'est plus mesurée par le nombre des lignes de force rencontrées par ce fil.

Et nos répugnances ne proviennent pas seulement de ce qu'il est difficile de renoncer à des habitudes invétérées de langage et de pensée. Il y a quelque chose de plus. Si nous ne croyons pas aux actions à distance, il faut expliquer les phénomènes électrodynamiques par une modification du milieu. C'est précisément cette modification que l'on appelle champ magnétique, et alors les effets électrodynamiques ne devraient dépendre que de ce champ.

Toutes ces difficultés proviennent de l'hypothèse des courants ouverts.

On peut même présenter l'objection sous une autre forme : Peut-il exister des courants ouverts? Cela dépend de la définition que l'on donne du courant. Si par courant on entend seulement courant de conduction, il est clair qu'il existe des courants ouverts; nous en avons cité des exemples. Mais si l'on appelle courant *ce qui agit sur le galvanomètre*, tous les courants sont fermés par définition.

Et, en effet, si l'on décrit un petit contour entourant le fil parcouru par le courant, celui-ci sera

égal *par définition* à la force magnétique mesurée par la déviation de l'aiguille aimantée, ou plutôt à la valeur moyenne de cette force le long de ce contour.

Donc, si l'on a une aire quelconque, la somme algébrique des intensités des courants qui traversent cette aire sera proportionnelle au travail de la force magnétique le long du contour qui limite cette aire. Ce sera là la définition même du courant.

Imaginons alors qu'il existe un courant ouvert AMB (fig. 2), et soit B une de ses extrémités. Soit CPDQ un volume quelconque en forme de lentille, contenant B à son intérieur. Sur la figure, j'aurai en CPD la section d'une des faces de la lentille et en CQD la section de l'autre face.

La courbe qui sert de contour commun à ces deux faces coupe le plan de la figure en C et en D.

Alors, le travail de la force magnétique le long de cette courbe CD sera proportionnel à la somme des courants qui traversent la face CPD limitée par cette courbe. Il ne sera donc pas nul, puisque cette face est traversée par le courant AMB. D'autre part, ce travail sera proportionnel à la somme des courants qui traversent la face CQD limitée également par cette courbe. Il sera donc nul, puisque cette face n'est traversée par aucun courant.

Il y a donc contradiction, et, si l'on définit le courant par le galvanomètre, il ne peut y avoir de courant ouvert, et il ne s'agit pas de savoir si le courant se ferme, mais *comment il se ferme*. On peut appliquer cela en particulier à la théorie de Helmholtz, et on voit alors que cette théorie revient en somme à admettre que les courants de conduction ouverts sont fermés par certains courants auxiliaires dont l'expression est assez simple, et qui ne sont pas sans analogie avec les courants de déplacement de Maxwell.

IV. — THÉORIE DE MAXWELL.

Telles étaient les difficultés soulevées par les théories régnantes quand parut Maxwell, qui, d'un trait de plume, les fit toutes disparaître. Dans ses idées, en effet, il n'y a plus que des courants fermés.

Maxwell admet que, si, dans un diélectrique, le champ électrique vient à varier, ce diélectrique devient le siège d'un phénomène particulier agis-

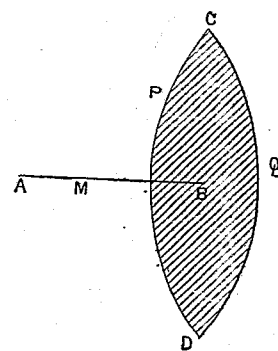


Fig. 2.

sant sur le galvanomètre comme un courant et qu'il appelle *courant de déplacement*.

Si alors deux conducteurs portant des charges contraires sont mis en communication par un fil, il règne dans ce fil pendant la décharge un courant de conduction ouvert; mais il se produit en même temps, dans le diélectrique ambiant, des courants de déplacement qui ferment ce courant de conduction.

On sait que la théorie de Maxwell conduit à l'explication des phénomènes optiques, qui seraient dus à des oscillations électriques extrêmement rapides.

Au bout de vingt ans, les idées de Maxwell reçurent la confirmation de l'expérience. Hertz parvint à produire des systèmes d'oscillations électriques qui reproduisent toutes les propriétés de la lumière et n'en diffèrent que par la longueur d'onde, c'est-à-dire comme le violet diffère du rouge. Il fit en quelque sorte la synthèse de la lumière.

On pourrait dire que Hertz n'a pas démontré directement l'idée fondamentale de Maxwell, l'action du courant de déplacement sur le galvanomètre. C'est vrai dans un sens, et ce qu'il a montré directement, en somme, c'est que l'induction électromagnétique ne se propage pas instantanément comme on le croyait, mais avec la vitesse de la lumière.

Seulement, supposer qu'il n'y a pas de courant de déplacement et que l'induction se propage avec la vitesse de la lumière; ou bien, supposer que les courants de déplacement produisent des effets d'induction et que l'induction se propage instantanément, *cela est la même chose*.

C'est ce qu'on ne voit pas au premier abord, mais ce que l'on démontre par une analyse que je ne puis même songer à résumer ici.

V. — EXPÉRIENCES DE ROWLAND.

Mais, je l'ai dit plus haut, il y a deux sortes de courants de conduction ouverts: Il y a d'abord les courants de décharge d'un condensateur ou d'un conducteur quelconque.

Il y a aussi les cas où des charges électriques décrivent un contour fermé, en se déplaçant par conduction dans une partie du circuit et par convection dans l'autre partie.

Pour les courants ouverts de la première sorte, la question pouvait être regardée comme résolue: ils étaient fermés par les courants de déplacement.

Pour les courants ouverts de la deuxième sorte, la solution paraissait encore plus simple; si le courant était fermé, ce ne pouvait être, semblait-il, que par le courant de convection lui-même. Pour

cela, il suffisait d'admettre qu'un « courant de convection », c'est-à-dire un conducteur chargé en mouvement, pouvait agir sur le galvanomètre.

Mais la confirmation expérimentale manquait. Il paraissait difficile, en effet, d'obtenir une intensité suffisante, même en augmentant autant que possible la charge et la vitesse des conducteurs.

Ce fut Rowland, un expérimentateur extrêmement habile, qui le premier triompha ou parut triompher de ces difficultés. Un disque recevait une forte charge électrostatique et une très grande vitesse de rotation. Un système magnétique astatique, placé à côté du disque, subissait des déviations.

L'expérience fut faite deux fois par Rowland: une fois à Berlin, une fois à Baltimore; elle fut ensuite reprise par Himstedt. Ces physiciens crurent même pouvoir annoncer qu'ils avaient pu effectuer des mesures quantitatives.

En fait, depuis une vingtaine d'années, la loi de Rowland était admise sans contestation par tous les physiciens.

Tout, d'ailleurs, paraissait la confirmer. L'étincelle produit certainement un effet magnétique; or, ne semble-t-il pas vraisemblable que la décharge par étincelle est due à des particules arrachées à l'une des électrodes et transportées sur l'autre électrode avec leur charge? Le spectre même de l'étincelle, où l'on reconnaît, les raies du métal de l'électrode n'en est-il pas une preuve? L'étincelle serait alors un véritable courant de convection.

D'un autre côté, on admet aussi que, dans un électrolyte, l'électricité est convoyée par les ions en mouvement. Le courant dans un électrolyte serait donc aussi un courant de convection; or, il agit sur l'aiguille aimantée.

De même pour les rayons cathodiques; Crookes attribuait ces rayons à l'effet d'une matière très subtile, chargée d'électricité négative, et animée d'une très grande vitesse; il les regardait, en d'autres termes, comme des courants de convection. Or, ces rayons cathodiques sont déviés par l'aimant. En vertu du principe de l'action et de la réaction, ils doivent à leur tour dévier l'aiguille aimantée.

Il est vrai que Hertz crut avoir démontré que les rayons cathodiques ne convoient pas d'électricité négative et qu'ils n'agissent pas sur l'aiguille aimantée. Mais Hertz se trompait; d'abord Perrin a pu recueillir l'électricité transportée par ces rayons et dont Hertz niait l'existence; le savant allemand paraît avoir été trompé par des effets dus à l'action des rayons X, qui n'étaient pas encore découverts. Ensuite, et tout récemment, on a mis en évidence l'action des rayons cathodiques sur l'aiguille aimantée.

Ainsi, tous ces phénomènes regardés comme des courants de convection, étincelles, courants élec-

trolytiques, rayons cathodiques, agissent de la même manière sur le galvanomètre et conformément à la loi de Rowland.

VI. — THÉORIE DE LORENTZ.

On ne tarda pas à aller plus loin. D'après la théorie de Lorentz, les courants de convection eux-mêmes seraient de véritables courants de convection : l'électricité resterait indissolublement attachée à certaines particules matérielles appelées *électrons* ; ce serait la circulation de ces électrons à travers les corps qui produirait les courants voltaïques, et ce qui distinguerait les conducteurs des isolants, c'est que les uns se laisseraient traverser par ces électrons, tandis que les autres arrêteraient leurs mouvements.

La théorie de Lorentz est très séduisante, elle donne une explication très simple de certains phénomènes dont les anciennes théories, même celle de Maxwell sous sa forme primitive, ne pouvaient rendre compte d'une façon satisfaisante, par exemple, l'aberration de la lumière, l'entraînement partiel des ondes lumineuses, la polarisation magnétique, l'expérience de Zeeman.

Quelques objections subsistaient encore. Les phénomènes dont un système est le siège semblaient devoir dépendre de la vitesse absolue de translation du centre de gravité de ce système, ce qui est contraire à l'idée que nous nous faisons de la relativité de l'espace. A la soutenance de M. Crémieu, M. Lippmann a mis cette objection sous une forme saisissante. Supposons deux conducteurs chargés, animés d'une même vitesse de translation. Ils sont en repos relatif ; cependant, chacun d'eux équivalant à un courant de convection, ils doivent s'attirer, et on pourrait, en mesurant cette attraction, mesurer leur vitesse absolue.

Non, répondaient les partisans de Lorentz ; ce que l'on mesurerait ainsi, ce n'est pas leur vitesse absolue, mais leur vitesse relative *par rapport à l'éther*, de sorte que le principe de relativité est sauf.

Quoi qu'il en soit de ces dernières objections, l'édifice de l'Électrodynamique semblait, au moins dans ses grandes lignes, définitivement construit ; tout se présentait sous l'aspect le plus satisfaisant ; les théories d'Ampère et de Helmholtz, faites pour les courants ouverts qui n'existaient plus, ne semblaient plus avoir qu'un intérêt purement historique, et on avait à peu près oublié les complications inextricables auxquelles ces théories conduisaient.

VII. — PREMIÈRES EXPÉRIENCES DE M. CRÉMIEU.

C'est cette quiétude que les expériences de M. Crémieu sont venues troubler. Ce jeune physicien

débuta par une expérience fort intéressante, dont je ne parlerai pas ici parce qu'elle ne se rapporte à notre sujet qu'indirectement et que cet article est déjà trop long, mais qui le mit sur la voie de ses recherches ultérieures en lui inspirant des doutes sur les résultats de Rowland :

Dans les expériences de Rowland, l'appareil astatique magnétique doit être très sensible et placé tout près du disque tournant ; on peut craindre dans ces conditions des perturbations, soit électrostatiques, à cause des fortes charges que porte ce disque, soit mécaniques, à cause des courants d'air dus à sa rotation rapide.

D'un autre côté, si un courant de convection produit un champ magnétique, il doit produire également des effets d'induction ; et, au lieu d'observer la déviation d'une aiguille astatique, on peut observer les courants induits par un courant de convection variable dans un circuit voisin.

Pour mesurer ces courants induits, il faudra naturellement encore une aiguille astatique ; mais on pourra l'éloigner autant qu'on voudra du disque tournant et, par conséquent, des causes perturbatrices.

Dans ces conditions, les résultats obtenus furent négatifs.

Le dispositif, toutefois, différait beaucoup de celui de Rowland, et, avant d'aller plus loin, il importait de reprendre les expériences du savant américain dans des conditions identiques ou aussi peu différentes que possible. Les résultats restèrent négatifs *en général*, mais il faut reconnaître qu'ils furent beaucoup plus capricieux. Dans certaines séries, on constata des déviations de l'appareil astatique. Ces déviations purent souvent être attribuées avec certitude à une cause perturbatrice déterminée ; d'autres fois, elles restèrent sans explication satisfaisante.

Si l'on considère toutefois que les résultats ont été constamment négatifs dans de nombreuses séries où le disque tournant était à découvert (au moins dans la partie voisine de l'aiguille aimantée), pourvu que cette aiguille fût mise à l'abri des perturbations électrostatiques par un tube de cuivre formant écran ; que, dans d'autres circonstances où l'on avait observé une déviation de la plaque de mica portant les aiguilles aimantées, *cette déviation subsistait encore quand les aiguilles aimantées étaient enlevées*, ce qui prouvait bien son origine électrostatique, on sera frappé de l'importance de ces perturbations électrostatiques et on sera porté à accorder plus de confiance à la première forme de l'expérience où ces perturbations sont complètement écartées.

Remarquons pourtant que Rowland avait eu soin d'enfermer son aiguille aimantée dans un tube

métallique formant écran et que les résultats avaient été positifs.

Les expériences de Crémieu peuvent sembler convaincantes à ceux qui les ont vues; mais on ne peut oublier pourtant que Rowland était un expérimentateur tout aussi habile, qu'il a montré ses résultats à plusieurs savants éminents et que ces savants ont été également convaincus.

Dans ces conditions, on hésite à se prononcer et on en vient à désirer qu'une sorte de tiers arbitre tranche définitivement la question. Quelques personnes avaient commencé des recherches en Angleterre, mais elles ne paraissent pas les avoir poussées jusqu'au bout.

De son côté, Rowland s'était remis au travail et voulait reprendre les expériences de Crémieu et les siennes. C'est alors malheureusement que la mort est venue le surprendre. Certes, à n'importe quel moment la mort d'un physicien aussi éminent aurait été une perte cruelle pour la Science, mais elle est pour nous aujourd'hui doublement fâcheuse. Qui pouvait mieux que lui découvrir la cause des divergences entre les résultats du savant français et les siens? Celui qui voudra les chercher maintenant, eût-il même l'habileté de Rowland, ne pourra connaître aussi bien que lui les détails de son appareil et la façon dont il a opéré autrefois.

VIII. — CRITIQUES DIVERSES.

Les critiques de Crémieu ont généralement suivi une autre voie; ils n'ont pas contesté les résultats expérimentaux; ils ont cherché plutôt à montrer qu'on aurait pu les prévoir; que, loin d'être contraires à la loi de Rowland, ils en étaient une confirmation indirecte.

La plupart de ces critiques se sont trop pressées; la thèse de M. Crémieu vient seulement de paraître, et jusque-là on ne connaissait que quelques Notes succinctes insérées aux *Comptes Rendus*; il en résulte que beaucoup des observations qu'on avait cru pouvoir faire, ou bien ne se rapportaient pas exactement aux expériences qui avaient été réellement faites, ou bien étaient réfutées d'avance par d'autres formes de ces mêmes expériences.

Quelques-unes de ces objections ont cependant plus de portée; je ne puis les discuter ici en détail, mais je voudrais, au moins, en indiquer l'esprit et faire voir d'une façon générale ce qu'on peut en tirer.

On sait que Faraday a substitué le premier aux anciennes idées classiques sur l'électricité une façon entièrement différente d'envisager les choses. Pour lui, la réalité véritable, ce n'est plus un fluide électrique circulant dans des conducteurs, mais une certaine modification du diélectrique qui

cesse d'être purement inerte et devient le siège du phénomène principal. Ce qui joue le premier rôle, c'est donc le « champ électrique », le « champ magnétique » et la distribution des « lignes de force ».

Ces conceptions, considérées d'abord comme paradoxales, sont aujourd'hui familières à tout le monde, aux praticiens comme aux théoriciens. C'est de Faraday que Maxwell procède directement; les théories qui sont sorties de celle de Maxwell, par exemple celles de Hertz et de Lorentz, dérivent donc des idées de Faraday. Mais cela ne veut pas dire qu'il y a identité entre la pensée de Faraday et celle de Lorentz.

La théorie de Lorentz est sortie de celle de Faraday, mais beaucoup d'autres en auraient pu sortir. La pensée de Faraday n'était qu'une forme encore vague et indéterminée, une sorte de pâte molle, qui pouvait se préciser de bien des manières. C'est justement ce qui en a fait la fécondité.

En ce qui concerne la question de la convection qui nous occupe maintenant, les partisans de Faraday n'admettront pas qu'on identifie à un courant voltaïque un conducteur chargé en mouvement; cela serait croire que l'électricité est quelque chose; cela serait, à leurs yeux, un matérialisme grossier. Mais ils diront qu'un champ magnétique doit se produire si les lignes de force électrique sont en mouvement.

Les lignes de force, pour eux, ne sont pas, en effet, de simples entités mathématiques; ce sont des objets réels, et c'est pourquoi ils croient s'entendre eux-mêmes quand ils disent que ces objets sont en repos ou en mouvement, de même que les anciens électriciens croyaient s'entendre eux-mêmes quand ils parlaient du mouvement de l'électricité, qui pour eux était une chose.

Mais cela ne suffit pas; pour que cette considération puisse servir à quelque chose, il faut savoir reconnaître si ces lignes sont en mouvement. Elles peuvent se mouvoir, soit; mais comment saurons-nous si elles se meuvent?

Le problème s'est posé d'abord à propos des lignes de force magnétique, et a donné lieu à de longues polémiques. Les lignes de force émanées d'un aimant qui tourne, tournent-elles avec cet aimant ou restent-elles immobiles? Selon la réponse à cette question, il semblait, à en croire beaucoup d'auteurs, que certains phénomènes, et en particulier ceux de « l'induction unipolaire », devaient être très différents. J'ai montré ailleurs qu'il n'en était rien et que la question n'a pas de sens.

En ce qui concerne les lignes de force électrique, au contraire, la question ne peut être éludée et, suivant la solution qu'on lui donnera, on arrivera

à des conséquences absolument différentes. Un courant voltaïque circule dans un fil. Admettrons-nous que les lignes de force qui aboutissent à ce fil se déplacent de façon que leurs extrémités se meuvent le long de ce fil, dans le sens du courant; ou même devrons-nous admettre deux systèmes de lignes de force, les unes positives, les autres négatives et se déplaçant en sens contraire? Il le faut bien, si nous voulons rendre compte des effets magnétiques du courant voltaïque, et si nous croyons qu'un champ magnétique ne peut être dû qu'au mouvement des lignes de force électrique.

Supposons maintenant un disque chargé tournant; entraînera-t-il les lignes de force dans sa rotation, ou resteront-elles immobiles? Aucune de ces deux hypothèses ne peut être regardée comme en contradiction avec les idées de Faraday; et cependant, dans un cas, la loi de Rowland est vraie; dans l'autre, elle est fausse.

Ce qui est gênant, c'est que chacune de ces interprétations contradictoires peut, à son tour, apparaître comme la seule naturelle, suivant le point de vue où on se place.

Faraday, Maxwell lui-même avaient beaucoup laissé dans le vague. Leurs successeurs ont cherché à préciser; quelques-uns croyaient y être parvenus, et deux théories complètes s'étaient édifiées, celle de Hertz et celle de Lorentz.

Chacune de ces deux théories prétendait prévoir ce qui se passerait dans un cas quelconque. Elle nous prédisait, en particulier, et sans ambiguïté, ce que devaient donner les différentes expériences de Crémieu; or, ce n'est pas ce qu'elles ont donné. Donc, ou bien Crémieu s'est trompé, ce que des expériences nouvelles pourront seules nous apprendre, ou bien la théorie de Lorentz, comme celle de Hertz sont fausses.

Mais, répond-on, laissons Hertz et Lorentz de côté, et revenons à Faraday. Le résultat de Crémieu est ce que la doctrine de Faraday nous permettait de prévoir. Cela, c'est possible, car cette doctrine est plastique et peut prendre bien des formes, mais à ce compte elle permettait également de prévoir le résultat contraire.

Il y aurait sans doute beaucoup à tirer des écrits dont je parle. Mais à une condition: il aurait fallu que l'auteur commençât par distinguer entre les différentes interprétations possibles des vues de Faraday, qu'il les définît avec précision, puis qu'il s'attachât à discerner celles que l'expérience de Crémieu confirme et celles qu'elle contredit.

Loin de là, la plupart du temps, il se borne à constater, avec satisfaction, qu'elles ne sont pas toutes contredites.

Ce qu'il n'a pas fait, il faut donc que le lecteur le fasse pour lui. A ce prix, il pourra tirer du fruit

de sa lecture; il n'en tirera aucun, au contraire, s'il conclut simplement: « Ah! oui, ce que Crémieu a trouvé était facile à prévoir », et s'il croit ainsi que toutes les façons contradictoires de comprendre Faraday sont confirmées en bloc, celles de Hertz et de Lorentz comme les autres.

On comprend aisément la préoccupation qui a guidé ces critiques, dont beaucoup sont Anglais. Évidemment, les publications de Crémieu ont jeté l'alarme parmi les admirateurs de Maxwell; et alors ceux-ci s'efforcent de démontrer que nous ne serons pas réduits à abandonner les conquêtes de Faraday et de Maxwell. Cela, je l'espère bien, mais ce n'est pas de cela qu'il s'agit.

J'ai cru devoir insister sur ces observations, parce qu'il serait à craindre que ces critiques, mal comprises, ne fissent regarder comme inutiles ces expériences nouvelles qui, selon moi, sont nécessaires.

1. *Influence des écrans.* — D'après ce qui précède, on comprend pourquoi ces polémiques n'ont pas donné tous les fruits qu'on en aurait pu attendre. Je m'arrêterai seulement sur un point.

Dans une des nombreuses séries d'expériences qu'il a exécutées, M. Crémieu, qui continuait à avoir des résultats exclusivement négatifs quand l'appareil était enfermé dans une boîte métallique entièrement close, obtenait, au contraire, des déviations de l'aiguille aimantée quand il supprimait cette boîte.

À la vérité, ces déviations semblaient bien trop faibles pour pouvoir être attribuées à l'effet Rowland. Mais ce qui était remarquable, c'est qu'elles disparaissaient quand on interposait un écran métallique.

Cette série où se sont produits ces effets inexplicables, reste le point faible de l'œuvre de Crémieu. L'explication donnée par M. Crémieu lui-même ne tient pas debout; celles que j'ai proposées moi-même, étincelles, etc., demeurent problématiques.

Quoi qu'il en soit, ces anomalies ont particulièrement attiré l'attention de MM. Poddington et Wilson, qui ont cherché à démontrer:

1° Que l'effet Rowland doit se produire toujours en l'absence d'écran métallique, et ne disparaît que par suite de l'interposition d'un écran;

2° Que si les déviations observées par Crémieu sont plus faibles que les déviations prévues, c'est par suite d'erreurs d'expérience;

3° Enfin que cette disparition de l'effet Rowland par l'interposition d'un écran est un phénomène tout naturel et prévu par la théorie.

En ce qui concerne le premier point, M. Crémieu répond qu'il a fait aussi plusieurs séries d'expé-

riences où le disque chargé tournant était entièrement nu et sans aucune espèce d'écran métallique, et que les résultats ont été nettement négatifs. Telles sont les expériences relatées à la fin de sa thèse et celles dont je parlerai plus loin sous la rubrique : *Réalisation des courants ouverts*.

Mais examinons le troisième point. Pourquoi ces auteurs considèrent-ils la disparition de l'effet Rowland comme un phénomène prévu par la théorie? C'est parce qu'ils supposent qu'il doit se produire dans l'écran un courant de conduction dont l'effet contre-balance exactement celui du courant de convection.

Mais est-ce bien cela que prévoit la théorie?

Pour moi, cette question a un sens précis; par « la théorie », j'entends celle de Hertz ou celle de Lorentz; parce que, si la pensée de Faraday peut revêtir beaucoup d'autres formes, il n'y en a pas jusqu'ici d'autre qu'on ait développée complètement et mise sur ses pieds.

Que prévoit donc la théorie de Hertz? (Car, pour cette question particulière, celle de Lorentz conduirait au même résultat.)

Si nous avons un écran derrière lequel des charges positives se déplaceraient par convection, dans un mouvement rectiligne de translation, il est clair qu'elles induiraient sur l'écran des charges de nom contraire, qui se déplaceraient parallèlement, mais par conduction, de sorte qu'il y aurait compensation entre les deux sortes de courants.

C'est ainsi que raisonnent MM. Poddington et Wilson.

Mais si l'écran est circulaire et si les charges mobiles sont entraînées dans un mouvement de rotation, voici ce qui arrive : les charges induites sur l'écran restent toujours vis-à-vis des charges mobiles et se déplacent avec elles; ce déplacement se fait par conduction; mais ici ces charges induites peuvent aller d'une position à une autre par deux chemins, par le plus court et en faisant le tour de la circonférence. Cela fera deux courants de conduction, l'un direct, l'autre inverse.

Or, le calcul montre qu'il y a compensation entre le courant de conduction direct et le courant de conduction inverse, de sorte que le courant de convection devrait rester seul, bien loin qu'il y ait compensation entre le courant de convection et les courants de conduction.

La théorie ne prévoit donc nullement la disparition de l'effet Rowland par l'interposition d'un écran. Si donc les résultats de Crémieu n'étaient pas contredits par des expériences nouvelles, ils auraient prouvé que la théorie est en défaut quand même ils n'auraient pas démontré la non-existence de l'effet Rowland.

2. Objection et expérience de M. Pender. —

L'objection de M. Pellat, reprise par M. Pender, est beaucoup plus sérieuse. Dans la plupart des expériences, les secteurs mobiles comme les secteurs fixes étaient recouverts d'une couche de diélectrique (verre, caoutchouc ou ébonite). Si l'air interposé entre ces deux couches diélectriques, l'une fixe, l'autre mobile, n'était pas suffisamment isolant, il pourrait se faire que les surfaces de contact du diélectrique et de l'air prissent par influence des charges contraires à celles des surfaces de contact du diélectrique et du métal. Alors, le disque, en tournant, entraînerait à la fois des charges positives et négatives dont les effets se neutraliseraient.

M. Crémieu dit avoir vérifié qu'il n'en était pas ainsi, mais il a fait cette vérification sur les disques au repos, et M. Pender se demande si cela est encore vrai quand ils sont en mouvement.

Les pages qui précèdent étaient déjà composées quand a paru, dans le numéro d'août du *Philosophical Magazine*, la relation d'une expérience de M. Pender, qui ne s'est pas borné à une critique purement théorique.

Nous avons donc la satisfaction d'apprendre que les expériences dont je signalais la nécessité sont déjà commencées, et mieux encore, que Rowland, avant de mourir, a pu en dresser le plan et assister aux premiers essais.

M. Pender a repris l'expérience de Crémieu sous sa première forme, c'est-à-dire qu'il a étudié les courants induits produits par la variation du champ magnétique dû aux courants de convection.

Seulement, il s'est servi d'un disque tournant analogue à celui qu'avait employé Rowland et non pas à ceux qu'a employés Crémieu. C'est-à-dire que ces disques n'étaient pas enfermés dans une boîte en fonte; que les parties métalliques fixes et mobiles n'étaient pas recouvertes d'une couche de diélectrique et n'étaient séparées que par de l'air.

Il fallait, par conséquent, les éloigner l'une de l'autre, ce qui diminuait la capacité, et par conséquent l'intensité du courant de convection produit.

Dans ces conditions, les résultats ont été positifs, ce qui est contraire aux idées de Crémieu.

Il faut évidemment attendre ce que M. Crémieu répondra, et aussi de nouvelles expériences annoncées par M. Pender.

IX. — LE PROBLÈME DU COURANT OUVERT.

De nouvelles expériences sont encore nécessaires.

M. Pender et M. Crémieu doivent les faire cet hiver, chacun de son côté.

Supposons qu'à la suite de ces expériences les

idées de M. Crémieu viennent à triompher; sera-ce là une solution définitive? Non, la difficulté ne fera que commencer. Sur les ruines des anciennes théories, il faudra rebâtir.

Ce que j'ai dit au début fera comprendre aisément la nature de cette difficulté. Va-t-on être obligé de revenir à l'hypothèse des courants ouverts, et dans ce cas ne va-t-on pas se trouver aux prises avec les complications inextricables des théories, abandonnées, d'Ampère et de Helmholtz?

Dans les expériences où l'on fait simplement tourner un disque chargé, la contradiction n'apparaît pas encore. La répartition des charges demeure invariable, puisque chaque charge électrique, en quittant un point de l'espace, y est immédiatement remplacée par une autre charge égale.

Le champ électrique ne change pas; le courant de convection se ferme sur lui-même, il n'y a donc pas de courant ouvert.

La difficulté commencerait, au contraire, si nous avions affaire à une petite sphère isolée et chargée, entraînée dans un mouvement de translation ou de rotation, qui serait, par exemple, attachée sur la circonférence d'un disque tournant, isolant et sans charge. Alors, le point de l'espace où était la sphère chargée est occupé un instant après par de la matière isolante dépourvue de charge. La répartition des charges n'est plus invariable et la distribution des lignes de force change à chaque instant. Il y a dans le diélectrique ce que Maxwell appelle un courant de déplacement.

Dans la conception Maxwell-Rowland, le circuit complet, qui est fermé, se compose de courants de déplacement et de courants de convection. Si maintenant nous admettons que les courants de convection sont sans action, il ne nous reste plus que des courants de déplacement *ouverts*.

Malheureusement, il est à peu près impossible d'opérer de la sorte, pour plusieurs raisons, et surtout parce que la capacité d'une pareille sphère serait beaucoup trop petite.

En revanche, on peut chercher à réaliser des circuits fermés, composés de courants de convection et de courants de conduction. Si les courants de convection sont regardés comme sans action, il restera alors un courant de conduction *ouvert*.

C'est la réalisation de ces courants ouverts qui constitue, à proprement parler, le paradoxe.

Et, comme c'est en allant au devant des difficultés qu'on peut espérer des résultats nouveaux, ce sont ces courants ouverts qu'il importait de réaliser. M. Crémieu a donc, sur mon conseil, fait deux tentatives dans ce sens :

1. *Première tentative.* — Dans un premier dispositif, on fait tourner un disque doré, dont la

dorure est interrompue par une série de rainures circulaires; ces rainures, toutefois, ne règnent pas sur toute la circonférence, de sorte que toutes les parties de la dorure restent en communication entre elles et peuvent être mises au sol.

La figure 3 représente ce disque, les parties dorées étant couvertes de hachures. On voit que sur la plus grande partie du disque, il peut y avoir des courants circulaires, mais pas de courants radiaux.

Vis-à-vis de ce disque tournant, on place un secteur métallique fixe en communication avec une batterie d'accumulateurs. Ce secteur et la dorure du disque tournant vont former les deux armatures d'un condensateur.

Le secteur fixe va se charger positivement, par exemple, et le disque mobile se chargera négativement par influence. Seulement, ces charges négatives resteront toujours dans la partie du disque qui est vis-à-vis du secteur fixe; elles seront donc fixes dans l'espace; mais, comme le disque qui les porte est en mouvement, elles seront en mouvement relatif par rapport à ce disque.

Les charges positives, étant fixes dans l'espace et fixes par rapport au conducteur qui les porte, ne produiront aucune action magnétique. Qu'arrive-t-il maintenant dans le disque mobile?

Si les charges négatives étaient invariablement fixées au disque, elles seraient entraînées par le mouvement de ce disque, ce qui constituerait un courant de convection. Ce courant ne serait contrebalancé par rien si le disque était chargé, mais parfaitement isolant; ou encore s'il était formé d'un très grand nombre de conducteurs très petits et parfaitement isolés les uns des autres. Chacun de ces petits conducteurs conservera sa charge invariable et l'entraînera avec lui; seulement, quand l'un d'eux ne sera plus vis-à-vis du secteur fixe, sa capacité diminuera, et, puisque sa charge n'a pas changé, son potentiel augmentera. Il se produira donc des différences de potentiel entre les différents petits conducteurs.

Supposons maintenant que l'isolement de ces petits conducteurs ne soit pas parfait; il se produira entre eux des courants de conduction qui tendront à diminuer la différence des potentiels, en ramenant les charges vis-à-vis du secteur fixe.

Les différences de potentiel qui pourront se maintenir ainsi, seront évidemment d'autant plus

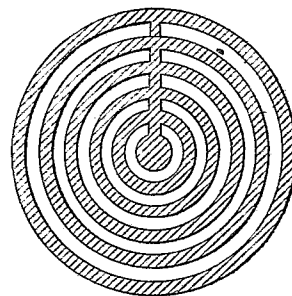


Fig. 3.

grandes que l'isolement sera meilleur; si nous passons enfin au cas de notre disque doré, la résistance opposée aux courants de conduction sera très faible, de sorte que ces différences seront extrêmement petites et que la distribution s'écartera très peu de la distribution statique.

Les charges négatives sont donc soumises, d'une part, à un courant de convection qui tend à les écarter de leur position normale, vis-à-vis du secteur fixe, et, d'autre part, à des courants de conduction qui les y ramènent sans cesse.

Comment sont distribués ces courants de conduction? Les charges écartées de leur position normale peuvent y revenir par deux chemins, par le plus court, ou en faisant le tour du disque; c'est ce que j'appellerai le courant de conduction direct et le courant inverse.

Comme le premier chemin oppose beaucoup moins de résistance que le second, il est clair que le courant direct sera plus intense que le courant inverse. Si, par exemple, le secteur fixe occupe la sixième partie de la circonférence, le courant direct sera égal aux $\frac{5}{6}$ et le courant inverse au $\frac{1}{6}$ du courant de convection.

Dans les idées de Rowland, que doit-il se passer? Nous aurons le courant de convection dont l'intensité sera par exemple 1, qui sera compensé en partie par le courant de conduction direct dont l'intensité est $\frac{5}{6}$; l'intensité résultante sera $\frac{1}{6}$, nous aurons donc un effet sur l'aiguille aimantée, mais cet effet sera assez faible.

Dans les idées de Crémieu, au contraire, le courant de convection n'agit pas; il semble qu'il doit rester seulement le courant de conduction direct égal à $\frac{5}{6}$ et que l'effet produit doit être cinq fois plus grand que dans les idées anciennes.

Ces courants de conduction vont du bord aval (d'après le sens de la rotation) de la portion du disque mobile qui est vis-à-vis du secteur fixe, au bord amont de cette même portion; ce seraient donc des courants ouverts; de sorte qu'on aurait réalisé le courant de conduction ouvert et que Crémieu pouvait avoir l'espoir de vérifier ses vues par une expérience donnant un résultat positif (la déviation devant être cinq fois plus grande que dans l'hypothèse de Rowland), tandis qu'il n'avait eu jusque-là que des résultats négatifs.

A la vérité, cet espoir n'était pas grand; car Rowland avait déjà essayé un dispositif analogue. En fait, il n'y eut pas de déviation du tout, résultat également contraire à l'ancienne et à la nouvelle théorie.

Cela est resté jusqu'ici inexpliqué. Crémieu pense

que les courants qui ramènent les charges à leurs positions normales ne sauraient être assimilés à de véritables courants de conduction, qu'ils ne produisent pas de chaleur de Joule, qu'il ne se produit pas, dans le disque, des différences de potentiel même très faibles; qu'enfin, c'est pour cela que ces courants n'ont pas d'effet magnétique: mais je ne saurais en aucune façon adopter cette manière de voir.

Cette première tentative pour obtenir des courants ouverts avait donc échoué; j'ajouterai cependant que M. Crémieu a, je crois, l'intention de la reprendre en modifiant les dispositions des rainures qui interrompent la dorure du disque.

2. *Réalisation des courants ouverts.* — Ce premier échec ne découragea pas M. Crémieu, qui, sur mon conseil, essaya un dispositif différent.

La figure 4 représente ce dispositif schématique-

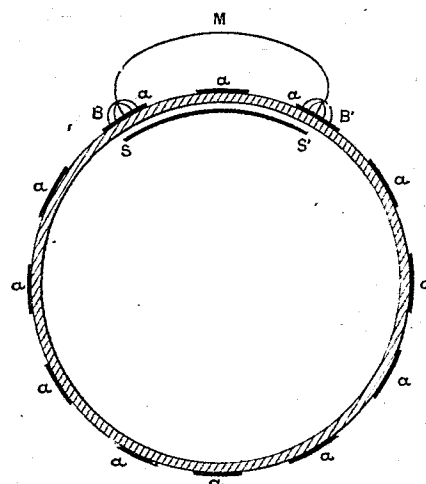


Fig. 4.

ment. Elle est construite comme on le fait habituellement pour les schémas destinés à faire comprendre le fonctionnement des machines de Holtz ou de Wimshurst. Je veux dire que les disques tournants ou fixes sont supposés remplacés par des cylindres que la figure représente par leur section.

La partie essentielle de l'appareil est un plateau d'ébonite tournant; sur la figure, nous supposons ce plateau remplacé par un manchon cylindrique dont la section droite est représentée couverte de hachures. Ce plateau porte d'un côté des secteurs d'étain α , isolés les uns des autres. Un secteur fixe SS' , placé près du disque tournant, est en communication avec une source d'électricité.

Vis-à-vis des deux bords de ce secteur fixe, deux balais B et B' frottent sur les secteurs d'étain α et sur le plateau d'ébonite; ces deux balais sont reliés par un fil B'MB.

Le plateau tournant dans le sens de la flèche, le secteur SS' est, par exemple, chargé positivement; le secteur α , sur lequel frotte le balai B, va se charger négativement par influence et sa charge négative lui viendra par le balai B et le fil B'MB. Ce secteur α , entraîné par le mouvement du disque, quittera le balai B et emportera sa charge.

Au bout d'un certain temps, il viendra au contact du balai B' et, en même temps, il cessera d'être en face du secteur SS', de sorte que sa charge négative cessera d'être retenue par l'influence de la charge positive de SS'. Le secteur α va donc abandonner sa charge au balai B' et au fil B'MB.

Les secteurs α compris entre B et B' seront donc chargés, les autres seront déchargés, les premiers entraîneront leur charge, ce qui constituera un courant de convection; les charges abandonnées au balai B' reviendront au balai B par le fil B'MB, de sorte que le circuit sera fermé par un courant de conduction.

En réalité, M. Crémieu a reconnu que les choses ne se passent pas d'une façon aussi simple, à cause du rôle important joué par la polarisation de l'ébonite; mais nous nous contenterons de cet aperçu.

L'expérience réussit parfaitement, beaucoup plus nettement que celles des séries précédentes. Il était facile de mesurer le courant de conduction B'MB au galvanomètre et de constater que le courant de convection n'agit pas sur l'aiguille aimantée; cette aiguille est déviée, au contraire, quand le fil de retour B'MB est placé tout contre le plateau tournant, tandis que, dans ce cas, il devrait, d'après les idées de Rowland, y avoir compensation entre l'effet du courant de convection et celui du courant de conduction.

M. Crémieu admet qu'il a réalisé un courant de conduction ouvert.

Pourquoi, maintenant, a-t-on réussi de cette manière et avait-on échoué avec le dispositif que j'ai d'abord décrit? C'est ce que M. Crémieu ne peut expliquer.

X. — EXPÉRIENCE DE M. CARVALHO.

Ainsi, le courant ouvert semble réalisé; nous sommes en face du paradoxe; il reste à le résoudre.

Nous ne pouvons croire à l'existence des courants ouverts, parce que nous n'arrivons pas à concevoir comment ils pourraient se comporter.

Maintenant, nous en avons un, ou nous croyons en avoir un; nous n'avons qu'à regarder comment il se comporte.

Va-t-il suivre les lois d'Ampère, ou bien celles de Helmholtz, ou d'autres encore?

D'après Ampère, nous l'avons vu, les courants ouverts doivent produire des rotations continues.

C'est là un critérium précieux. M. Carvalho a proposé de soumettre un aimant, dans des conditions convenables, à l'action de ce que Crémieu croit être un courant ouvert et de voir s'il tendra à prendre une rotation continue. M. Crémieu a commencé des essais dans ce sens. J'ai cru pouvoir sans indiscretion dire un mot de ce projet, puisque tout le monde en parle parmi les personnes qui s'intéressent à la Physique.

Peut-être les difficultés techniques ne permettront-elles pas de faire l'expérience; mais, si elle peut se faire, je serais étonné que l'aimant se mît à tourner; j'en serais étonné même si j'étais sûr que l'effet Rowland n'existe pas.

J'ai dit plus haut, en effet, les invraisemblances auxquelles conduit la théorie d'Ampère.

Celle de Helmholtz pourrait être soumise à un critérium analogue. On pourrait chercher si un solénoïde fermé peut subir une action de la part de ces soi-disant courants ouverts.

Mais la théorie de Helmholtz, quoique plus satisfaisante que celle d'Ampère, est encore bien invraisemblable. Avec elle, je l'ai expliqué ci-dessus, il n'y a pas, à proprement parler, de champ magnétique.

Admettre cela, ce serait, pour le coup, renoncer à l'idée fondamentale de Faraday, à ce qu'elle contient d'essentiel et non plus seulement à l'une des nombreuses formes qu'on peut lui donner.

J'aime mieux rappeler une remarque que j'ai faite plus haut: on peut définir les courants par leur action sur le galvanomètre, et alors tous les courants sont fermés *par définition*. Il n'y a plus dès lors qu'à rechercher *comment* un courant se ferme. Dans le cas qui nous occupe, nous croyions le savoir; mais, d'après M. Crémieu, ce ne serait pas comme cela. Il faut chercher autre chose; on le trouvera en étudiant systématiquement les déviations de l'aiguille aimantée dans le voisinage de ces courants paradoxaux et, en particulier, près des points où cessent les courants de conduction. C'est aussi ce que M. Crémieu a le projet de faire.

Quels que soient les résultats de ces expériences, nous aurons un champ magnétique et des courants qui seront fermés; cela est certain, puisqu'il n'y a là que des définitions.

Cela reste vrai dans toutes les hypothèses, aussi bien dans celles d'Ampère et de Helmholtz que dans les autres. Seulement, voici la différence: si nous restons fidèles aux idées de Faraday, l'action pondéromotrice subie par un élément de courant ne dépendra que de la force magnétique. Il n'en serait plus ainsi dans les vues d'Ampère ou de Helmholtz, et c'est pour cela que ces vues sont paradoxales.

J'arrêterai là ce trop long article, heureux si j'ai pu faire comprendre l'importance des problèmes

soulevés par les recherches de M. Crémieu et la nature des questions engagées dans le débat. Va-t-on se trouver en face du paradoxe du courant ouvert; va-t-on être obligé de chercher une nouvelle explication des rayons cathodiques, des cou-

rants électrolytiques, de la polarisation magnétique, du phénomène de Zeeman? C'est ce que nous saurons bientôt.

H. Poincaré,

Membre de l'Institut et du Bureau des Longitudes,
Professeur d'Astronomie théorique
et mécanique céleste à la Sorbonne.

LES SOURCES DE LA CRAIE

Quiconque rencontre une source s'y arrête et admire cette eau claire et limpide qui sourd de terre à cet endroit. Le cadre pittoresque, quelquefois sauvage, du lieu attire le poète, qui en chante les beautés. Le penseur, tout en se laissant aller à une douce rêverie, s'efforce d'expliquer l'origine de cette eau pure comme du cristal.

Nos ancêtres donnèrent, de la formation des sources, des théories souvent extravagantes. Ils en reportèrent longtemps l'origine à de vastes réservoirs, qu'ils plaçaient volontiers sous les montagnes d'où l'eau des sources semblait provenir.

Quant à se demander par quel hasard la Nature avait pu rendre étanches les parois de si vastes réservoirs, aucun ne s'était arrêté devant cette question.

Il vint un moment où l'on voulut expliquer l'alimentation de ces réservoirs, et ces explications furent suivies d'hypothèses, aussi compliquées que fantaisistes, que nous n'aborderons pas pour ne pas trop allonger notre sujet.

Quelques esprits curieux, avides de savoir ce que devenaient les eaux fournies par les pluies, remarquèrent que tous les terrains ne les utilisent pas de la même façon.

Sur certains sols, après les grandes pluies, il se forme des ruisseaux temporaires, qu'on n'observe pas sur d'autres. Ces eaux, dites de *ruissellement*, s'en vont rejoindre les thalwegs des vallées, puis les rivières et les fleuves, enfin la mer. Elles seront évaporées sous l'influence du soleil et retomberont sous forme de pluie. Le cycle de leur transformation est connu, il n'y a donc plus à s'en occuper.

Mais quand les eaux de ruissellement manquent, que devient l'eau de pluie?

L'évaporation, l'absorption par les végétaux en utilisent bien une partie; mais y a-t-il un excédent qui tende à s'enfoncer de plus en plus dans la terre? Les sources seraient toutes désignées pour expliquer l'évacuation de ces eaux, étant donné que, chaque année, à la même époque, le niveau de la nappe souterraine reste sensiblement le même.

Deux choses sont nécessaires à connaître: la quantité d'eau qui tombe actuellement sur un terrain perméable à l'eau, et celle prise par les végé-

taux par leurs parties aériennes. L'excédent de l'eau disponible prendra le nom d'eau d'infiltration.

Au moyen d'un instrument très connu et fort simple, le pluviomètre, on constate le volume d'eau tombé dans une année. Aux environs de Paris, un hectare reçoit par an environ 5.000 mètres cubes d'eau. Si tout arrivait aux sources, il faudrait 6 hectares pour obtenir un débit moyen de 1 litre par seconde environ pendant toute l'année, c'est-à-dire de quoi satisfaire à l'alimentation de plus de 250 Parisiens pendant plus d'un an. Mais Paris n'est pas l'un des lieux où il pleut le plus abondamment. Dans les pays de montagne, la quantité d'eau tombée est souvent doublée. Nous savons qu'elle n'est pas toute absorbée par le sol. Dans les terrains argileux, les eaux de ruissellement entraînent la plus grande partie de l'eau de pluie. Les sables, les graviers, les grès, les calcaires, etc., donnent peu d'eau de ruissellement; la quantité de celle-ci, essentiellement variable, augmentera avec les grandes pluies où les averses, chaque fois que l'arrivée de l'eau sera supérieure à son absorption. Les terrains boisés, les cuvettes, en un mot, tout ce qui tend à entraver la libre circulation des eaux de ruissellement, laissent le temps à la terre de les absorber et d'en diminuer la quantité.

Les études nombreuses faites sur l'évaporation de l'eau par les sols et les végétaux (celles de M. Dehérain entre autres) ont montré qu'ils étaient incapables d'utiliser une aussi grande quantité d'eau. Il y a donc un excédent, variable suivant que les eaux de ruissellement sont plus ou moins abondantes, mais qu'on évalue en moyenne au tiers des eaux tombées annuellement.

Une certaine quantité de l'eau des pluies arrivera donc à la nappe souterraine qui tendra à s'écouler par les orifices spéciaux qui forment les sources.

Comment se fait l'infiltration? Dans les terrains sableux (sables, graviers, galets), l'eau trouve, à travers les innombrables interstices de ces sols, des chemins pour s'y infiltrer.

Les grès et certaines craies s'imbibent d'eau sans pouvoir dépasser un certain taux d'humidité, au delà duquel toute arrivée d'eau par la partie supérieure est accompagnée de la mise en liberté d'une