



**HAL**  
open science

## Convection électrique et courants ouverts

V. Crémieu

► **To cite this version:**

V. Crémieu. Convection électrique et courants ouverts. J. Phys. Theor. Appl., 1901, 10 (1), pp.453-471. 10.1051/jphystap:0190100100045300 . jpa-00240540

**HAL Id: jpa-00240540**

**<https://hal.science/jpa-00240540>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## CONVECTION ÉLECTRIQUE ET COURANTS OUVERTS;

Par M. V. CRÉMIEU.

En général, on définit le courant électrique par son action sur le galvanomètre, et on admet que la force magnétique est proportionnelle à la *quantité d'électricité* qui a traversé le conducteur pendant l'unité de temps.

Si  $u, v, w$  sont les composantes du courant,  $\alpha, \beta, \gamma$  celles de la force magnétique, on écrit :

$$(1) \quad \left\{ \begin{array}{l} 4\pi u = \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} \\ 4\pi v = \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} \\ 4\pi w = \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} \end{array} \right.$$

on en déduit la relation suivante :

$$(2) \quad \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0,$$

qui exprime que tous les courants sont fermés. Si on admet entre l'électricité et l'éther lumineux les relations des théories actuelles, cette équation exprime à la fois l'incompressibilité de l'éther et la *conservation de l'électricité*.

D'autre part, dans les idées dont les équations (1) sont l'expression directe, toutes les fois qu'une même quantité d'électricité parcourra une même trajectoire dans un même temps, elle y produira le même champ magnétique, que cette trajectoire ait été suivie par elle, par conduction ou par tout autre moyen.

On a vérifié depuis longtemps que le transport d'électricité par l'étincelle disruptive obéit bien à cette loi.

D'ailleurs, dans les anciennes théories de l'électrodynamique et de l'induction, on admettait que les effets magnétiques du courant, dus uniquement au mouvement relatif de l'électricité, se manifesteraient quelle que soit la manière dont on réaliserait ce mouvement relatif, en particulier s'il se produisait à l'aide du support pondérable de l'électricité statique.

Dans les idées de Faraday, le champ magnétique est dû au *balayage*  
*J. de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. X. (Août 1901.)

de l'éther par les lignes de force électriques; ce phénomène devant rester le même, quelle que soit la façon dont s'opère le déplacement d'électricité qui lui sert d'origine. On retrouve donc chez l'araday<sup>(1)</sup> la même conception théorique, exprimée avec une netteté encore plus grande.

C'est à ce transport d'électricité par son support pondérable que Maxwell a donné le nom de *convection électrique*.

Je ferai remarquer, en passant, que cette hypothèse de l'effet magnétique de la convection électrique peut paraître en désaccord avec le principe de la *dégradation de l'énergie*.

Dans tous les phénomènes naturels que nous connaissons, nous constatons toujours qu'une transformation d'énergie s'accompagne d'une perte d'énergie irréversible.

Lorsque de l'énergie électrostatique se transforme en énergie électromagnétique, cette loi doit s'appliquer encore. La perte d'énergie se retrouve bien, en effet, dans la chaleur de Joule, lorsque cette transformation s'opère par conduction et dans les phénomènes mécaniques, calorifiques et lumineux qui accompagnent la décharge disruptive.

Pour la convection électrique, il n'en est pas de même. On pourrait très bien réaliser des courants de convection réversibles.

Pour concevoir, dans la convection, une perte d'énergie irréversible, il faudrait faire intervenir des hypothèses sur les liaisons de l'électricité statique et de la matière, et sur leur variation avec la vitesse de cette dernière.

J'ai fait une expérience, que je décrirai plus loin, destinée à voir si la liaison de la matière et de l'électricité variait avec le mouvement. Le résultat en a été négatif.

Je me contente, pour le moment, de signaler cette contradiction qui n'est peut-être qu'apparente.

On peut, du reste, faire la remarque suivante : Il est vrai, que chaque fois qu'il y a conduction, il y a chaleur de Joule. Mais, si on considère la dépense totale d'énergie due au passage d'une certaine quantité d'électricité à travers la section d'un conducteur, il semble que, pour un même travail électromagnétique, on puisse réduire presque indéfiniment la perte de chaleur irréversible de Joule, en prenant des conducteurs de moins en moins résistants.

---

(<sup>1</sup>) *Exp. Research.*, vol. 1, art. 1642 à 1644.

Il ne semble donc pas que le phénomène de la transformation d'énergie électrostatique en énergie électromagnétique soit susceptible d'un certain rendement maximum, et il est peut-être imprudent, par conséquent, d'appliquer ici le principe de la dégradation de l'énergie.

Plusieurs expérimentateurs ont essayé de vérifier directement l'existence de l'effet magnétique de la convection électrique.

M. Rowland, puis M. Himstedt, et ensuite MM. Rowland et Hutchinson obtinrent un résultat positif, tandis que M. Lecher obtenait un résultat négatif.

J'ai exposé ailleurs<sup>(1)</sup> comment j'avais été amené à reprendre ces expériences, dont j'ai donné une critique détaillée.

Elle peut se résumer en quelques lignes.

Toutes ces expériences consistaient à faire tourner rapidement un disque non conducteur, doré sur une partie de sa surface, et à observer les mouvements d'une aiguille aimantée placée au bord du disque, parallèlement à son plan, lorsqu'on venait à le charger ou à inverser le signe de sa charge.

L'intensité  $i$  du courant de convection est liée à la vitesse  $v$ , à la largeur  $l$  de la partie dorée du disque et à la densité superficielle  $\sigma$  de sa charge par la relation :

$$i = \sigma vl.$$

On voit immédiatement que, pour obtenir des valeurs appréciables de  $i$ , il faudra donner à  $\sigma$  des valeurs considérables, par suite de l'impossibilité matérielle où on se trouve de donner à  $v$  une valeur qui soit une fraction appréciable du rapport des unités électrostatiques et électromagnétiques.

Les potentiels de charge employés étaient en effet considérables : 8.000 à 15.000 volts, correspondant à des valeurs de  $\sigma$  de 1 à 3 C. G. S. électrostatiques.

Quant aux vitesses linéaires, elles étaient de 32 mètres à 64 mètres par seconde.

Les intensités correspondantes des courants de convection étaient comprises entre  $5 \times 10^{-6}$  et  $5 \times 10^{-5}$  ampères.

Pour mettre en évidence des courants aussi faibles circulant dans une seule spire de fil représentée par le disque tournant, il fallait

---

(1) CRÉMET, Thèse de Paris, Gauthier-Villars, 1901.

des systèmes magnétiques astatiques dont la sensibilité atteignit les plus extrêmes limites.

Or, par le principe même de l'expérience, on se trouvait amené à placer ces systèmes, très instables par nature, au voisinage immédiat de disques chargés à des potentiels très élevés et tournant très vite, par conséquent dans une région qui était le siège à la fois de perturbations électrostatiques considérables, de courants d'air très violents et, enfin, d'effets d'induction magnétique dus à la rotation rapide de pièces métalliques dans le champ terrestre ou accidentel du laboratoire.

Les conditions étaient donc *a priori* très mauvaises.

De plus, Rowland, dont les deux séries d'expériences présentent le plus de garantie, s'est toujours contenté de déviations permanentes très faibles (6 à 15 millimètres à 2 mètres de distance), du même ordre que les déviations ordinaires d'un système astatique sensible placé dans une région magnétiquement assez tranquille.

Ces déviations s'accordaient, il est vrai, avec celles calculées ; mais on voit de suite combien une coïncidence de cette nature est sujette à erreur, surtout lorsqu'on a en facteur de tous les calculs le nombre  $3 \times 10^{10}$ .

Quant à M. Himstedt, il n'observait que des impulsions et son appareil ne lui permettait de calculer à l'avance ni la grandeur de ces impulsions ni celle des déviations permanentes attendues. Il ne connaissait même pas la sensibilité de son système magnétique.

Lorsque j'ai abordé la question expérimentale, j'ai cherché une méthode différente qui me permit d'éloigner l'appareil de mesure des appareils d'expérience. En même temps, j'ai augmenté beaucoup la valeur de tous les facteurs dont dépend l'intensité de la convection, de façon à avoir, pour les déviations à observer, des valeurs calculées suffisamment grandes vis-à-vis de celles dues à la sensibilité même des appareils de mesure.

Le principe de la méthode consistait à faire agir, sur un circuit conducteur relié à un galvanomètre, les effets d'induction des courants de convection.

Un disque D, de 0<sup>m</sup>,37 de diamètre (*fig. 1*), solidaire d'un moyeu M monté sur billes d'acier, peut tourner autour d'un axe fixe A. Le disque est isolé du moyeu à l'aide de pièces d'ébonite E. On le charge par l'intermédiaire du fil F, de la bague métallique isolée H et du balai G. L'axe A est fixé par deux lames d'acier L au centre

de deux couronnes de fonte  $CC_1$ ,  $CC_1$ , laissant, entre elles, un intervalle de 8 millimètres, au milieu duquel tourne le disque. Les cou-

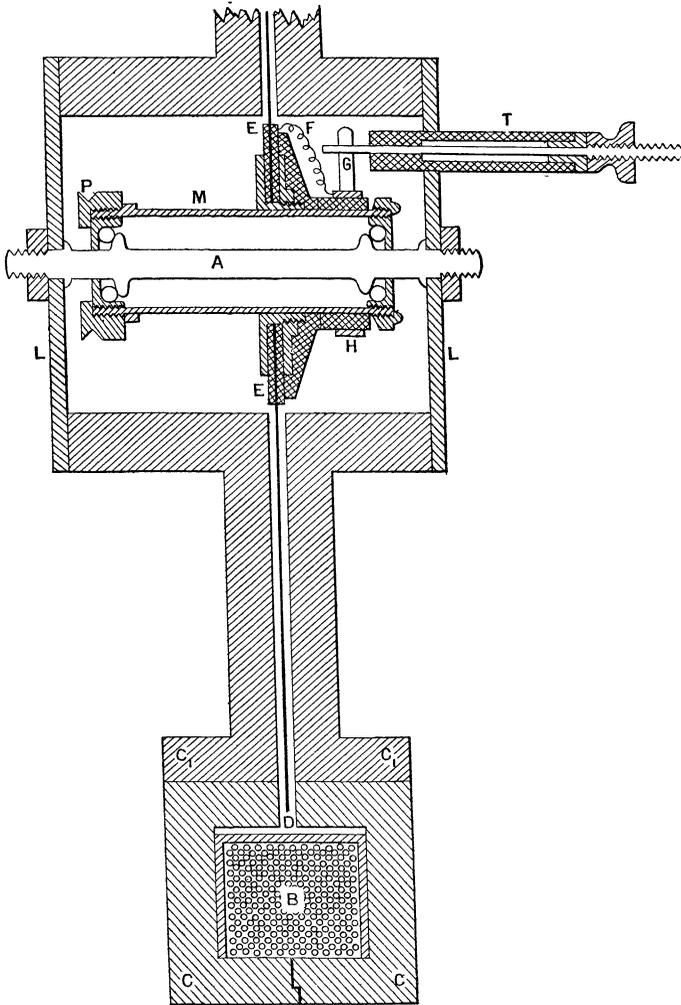


FIG. 1.

ronnes, reliées au sol, forment donc un condensateur dont le disque est l'armature interne. En même temps, ces couronnes de fonte

constituent un circuit magnétique autour d'une bobine B concentrique au disque. Cette bobine porte 13.000 tours de fil de cuivre de  $0^{\text{mm}},15$  de diamètre : ses extrémités sont reliées aux bornes d'un galvanomètre très sensible. Le mouvement est communiqué au disque par l'intermédiaire d'une courroie agissant sur la poulie P.

On voit que, si l'on fait tourner le disque très rapidement, puis qu'on le charge, le courant de convection ainsi créé induira un courant dans la bobine B. Pour rendre cet effet plus facile à observer, un commutateur produit plusieurs fois par seconde la charge et la décharge du disque et, en même temps, permet de n'envoyer dans le galvanomètre que les effets dus soit à la charge, soit à la décharge. On doit ainsi observer, au lieu d'une impulsion, une déviation permanente. Si l'on vient à rendre la charge égale et de signe contraire, on observera une déviation en sens inverse et double de la première.

La distance du disque tournant au galvanomètre étant de 6 mètres, l'effet direct de la rotation de la dynamo motrice du disque ou de l'interrupteur, ainsi que celui de la charge du disque immobile, était, par suite, sensiblement nul.

Le galvanomètre employé était un Thomson à 2 paires de bobines, dont la sensibilité, ramenée à zéro (formule de Kohlrausch), était, suivant les expériences, de  $5 \times 10^7$  à  $11,5 \times 10^7$ .

Il portait un miroir de 4 mètres de rayon. Les déviations brusques qu'il pouvait prendre pendant une période d'observation n'excédaient pas 6 ou 7 millimètres dans les plus mauvaises périodes ; ces chiffres sont très inférieurs à la valeur minimum des déviations attendues.

Le calcul de ces déviations reposait tout entier sur deux sortes de mesures :

D'une part, celles de la vitesse du disque, de la capacité de sa partie dorée et du potentiel de sa charge ;

D'autre part, de l'étalonnage de l'appareil entier, obtenu par le procédé suivant :

Sur un disque d'ébonite identique au disque tournant, on avait cousu six spires de fils de cuivre équidistantes, concentriques au disque, et de diamètre décroissant depuis 365 millimètres jusqu'à 110 millimètres.

On envoyait successivement dans chacune de ces spires, et à l'aide de l'interrupteur même servant à la charge du disque doré, des cou-

rants d'intensité connue, du même ordre d'intensité que celle attendue pour la convection.

En notant les déviations obtenues au galvanomètre pour chacune de ces spires, j'ai obtenu facilement un coefficient pratique de l'appareil tel que, connaissant l'intensité d'un courant circulant dans le primaire, on puisse calculer la déviation produite sur le galvanomètre relié au secondaire.

On voit par là que toutes les approximations plus ou moins légitimes qui auraient pu résulter du calcul direct du coefficient d'induction mutuelle de la bobine et du disque, se trouvaient éliminées.

Les intensités réalisées dans mes expériences étaient de  $5 \times 10^{-5}$  à  $5 \times 10^{-4}$  ampères, les déviations attendues de 30 à 160 millimètres.

Les déviations observées restèrent constamment nulles.

Du reste, j'ai vérifié, à la suite d'observations qu'on voulut bien me faire, les points suivants :

Le résultat reste le même :

Avec un disque tournant et des armatures continues ;

Avec un disque divisé en secteurs isolés et des armatures continues ;

Avec un disque et des armatures divisés en parties isolées.

D'ailleurs, ce résultat n'est pas modifié, d'une part, si on fait varier de 5 à 22 par seconde la fréquence de l'interrupteur de charge ;

D'autre part, si on fait varier dans des proportions considérables les valeurs relatives de la self-induction, de la capacité et de la résistance du circuit de charge du disque.

Les trois premières vérifications permettent d'affirmer que la charge communiquée au disque tournant, et cette charge seule, est bien entraînée.

Les deux autres, qu'aucun phénomène secondaire de décharge oscillante ne vient masquer l'effet attendu de la variation de charge du disque tournant.

Enfin, je me suis assuré, par une expérience directe, que la perméabilité magnétique de la fonte conservait bien une valeur suffisante pour des champs aussi faibles que ceux dus aux courants correspondant à chaque élément circulaire de la partie dorée et chargée du disque tournant.

A la suite de ces expériences, je pensais pouvoir tirer la conclusion suivante :

*Un disque tournant dans des conditions telles qu'on est sûr qu'il entraîne avec lui la charge électrique qu'on lui communique, ne donne pas, quand on fait varier cette charge, les effets d'induction que donnerait un courant de conduction transportant des quantités d'électricité égales, et soumis à des variations du même ordre.*

La question était trop importante pour en rester là ; d'ailleurs, les expériences sont si délicates qu'on ne saurait trop les contrôler.

Enfin, il y avait les résultats inverses des expériences antérieures de Rowland, confirmées par celles de M. Himstedt.

Avant de les reprendre, je voulus toutefois vérifier l'idée que j'ai précédemment exprimée.

Les expériences que je viens de décrire reviennent, en somme, à donner à l'une des armatures d'un condensateur un mouvement rapide de translation par rapport à l'autre armature, dans des conditions telles que, d'une part, la capacité géométrique ne varie pas, et, d'autre part, que l'armature mobile entraîne bien sa charge avec elle.

Or, si le mouvement de cette charge, mobile par rapport à la charge égale et de signe contraire de l'armature fixe, doit suffire à produire un champ magnétique, c'est-à-dire s'il y a transformation d'énergie électrostatique en énergie électromagnétique, il n'est pas absurde, *a priori*, de penser qu'on devra retrouver, au cours de ce mouvement, la perte d'énergie qui accompagne toutes les transformations d'énergie auxquelles il nous est donné d'assister.

Si, d'ailleurs, on admet l'existence de l'effet magnétique d'une charge en mouvement, on calcule que, si on vient à donner aux armatures supposées indéfinies d'un condensateur plan un mouvement de translation dans leur propre plan, l'attraction de ces armatures l'une pour l'autre diminuera quand la vitesse augmente et deviendra nulle lorsque cette vitesse sera égale au rapport des unités électriques. Pour cette vitesse, en effet, la répulsion électrodynamique serait justement égale à l'attraction électrostatique.

Comme il faut bien que ces actions électrostatiques et électrodynamiques résultent de la liaison entre la matière, d'une part, et ce que nous appelons électricité, d'autre part, il est assez naturel de supposer que la nature de cette liaison va se modifier avec la vitesse. Or, en mesurant la capacité de notre condensateur au repos et en mouvement, nous mesurons cette liaison même.

C'est cette mesure que j'ai réalisée.

Les disques au repos n'étaient jamais bien plans et leur position relative par rapport aux armatures fixes se modifiait à mesure que la vitesse augmentait jusqu'à une certaine valeur, à partir de laquelle le système était bien stable. C'était la valeur de la vitesse pour laquelle la force centrifuge était devenue égale aux forces élastiques qui déforment le disque au repos.

J'ai donc mesuré la capacité du disque pour cette valeur de la vitesse, qui était de 30 tours par seconde environ, et pour les valeurs maxima de 120 tours par seconde.

La capacité de la partie dorée des disques d'ébonite était d'environ 340 C. G. S. électrostatiques.

Je l'ai mesurée par une méthode de zéro, en opposant, sur un électromètre à cadran très sensible, le disque à un condensateur à capacité variable.

Celui-ci était un condensateur plan à anneau de garde ; le plateau mobile était commandé par une vis donnant le  $\frac{1}{100^e}$  de millimètre ; la surface du plateau central était de 78,5 centimètres carrés.

Comme la capacité aurait été trop faible, pour des épaisseurs d'air convenables, j'ai construit quatre condensateurs cylindriques fixes, à armatures d'air, mais très bien isolées à la paraffine. Chacun avait une capacité voisine de 400.

D'ailleurs, en chargeant les cadrans de l'électromètre à 700 volts, son aiguille donnait, sur une aiguille placée à 2 mètres de distance, une déviation de 10 à 12 millimètres pour 1 centième de volt.

Il est facile de voir que je pouvais, par conséquent, apprécier des variations de capacité de 1 centième de C. G. S. électrostatique, et, par suite, des variations de l'ordre des  $3 \times 10^{-6}$  de la valeur de la capacité de la dorure du disque tournant.

J'ai mesuré un très grand nombre de fois cette capacité pour une vitesse de 30 tours par seconde, puis pour une vitesse de 120 tours. Les résultats de ces mesures sont absolument concordants, et on ne trouve, entre les différents chiffres des deux séries et leurs moyennes, que des différences du même ordre que celles existantes entre les chiffres d'une même série et résultant des erreurs de la méthode même.

Il était assez naturel de supposer que la modification subie par la capacité devait être en raison directe du rapport de la vitesse linéaire

de l'armature au rapport  $V$  des unités électriques, c'est-à-dire à  $3 \times 10^{10}$ .

Or, la vitesse linéaire moyenne  $v$  variait de  $3 \times 10^3$  à  $10^4$ , et le rapport  $\frac{v}{V}$  de  $10^{-7}$  à  $4 \times 10^{-7}$ .

Ces sont des variations de l'ordre de celles que la méthode employée aurait permis d'évaluer.

Le résultat final semble donc négatif.

Il faut remarquer, toutefois, que les variations à mesurer sont aussi du même ordre que les erreurs d'expérience.

On ne saurait donc tirer, pour le moment, de conclusion bien nette.

Il y aurait peut-être lieu de reprendre ces déterminations avec une méthode plus sensible.

Après les résultats négatifs obtenus pour l'effet d'induction de la convection électrique, il était nécessaire de répéter les expériences relatives à l'effet magnétique de la convection.

Je me plaçai donc dans des conditions très voisines de celles où Rowland, puis M. Himstedt, avaient opéré.

J'utilisai d'ailleurs dans ce but, une grande partie des dispositifs expérimentaux qui m'avaient servi pour les recherches sur l'induction.

On trouvera <sup>(1)</sup> ailleurs une description détaillée des expériences effectuées.

Le principe était le suivant :

Un disque d'ébonite, doré suivant des secteurs isolés les uns des autres, tourne entre deux armatures parallèles diélectriques, à dorure divisée, elle aussi, en secteurs.

Parallèlement au plan du disque, et en dehors du condensateur ainsi formé, on place l'aiguille inférieure d'un système astatique très sensible dont l'aiguille supérieure se trouve assez loin du disque pour que son action sur elle soit négligeable.

Dans ces conditions, on vérifie, d'une part, que la charge ou la décharge du disque immobile ne produit aucune déviation de l'aiguille aimantée ; il est nécessaire, pour y arriver, d'entourer le système astatique d'un écran électrique relié au sol.

---

(1) CRÉMIEU, *loc. cit.*

D'autre part, on s'assure que la rotation du disque non chargé n'influe pas sur le même système.

On fait alors tourner le disque et on le charge. Si la convection produisait un effet magnétique, on devrait avoir, à ce moment, une déviation de l'aimant.

Les quantités d'électricité transportées par convection atteignaient, dans ces expériences, jusqu'à  $5 \times 10^{-4}$  coulombs par seconde, c'est-à-dire environ 100 fois plus que dans les expériences de Rowland, et 10 fois plus que dans celles de M. Himstedt.

La sensibilité du système astatique était de  $2 \times 10^5$  à  $3,7 \times 10^5$  (Kohlrausch), c'est-à-dire du même ordre que celle du système de Rowland.

Cette sensibilité était mesurée à l'aide d'une spire témoin, de diamètre calculé égal à la partie moyenne de la région dorée du disque tournant, et fixée dans l'appareil, dans une position symétrique de celle du disque par rapport à l'aiguille inférieure du système astatique.

Les chiffres donnés ci-dessus expriment la sensibilité ramenée à 0 du galvanomètre formée par cette spire témoin et le système astatique.

D'ailleurs, cette spire permettait de comparer, à chaque instant, au courant de convection, un courant de conduction équivalent.

Or, les résultats obtenus furent constamment négatifs, bien que les déviations attendues fussent très notables (70 millimètres en moyenne à 4 mètres de distance).

Il fallait, en présence de ce résultat, retrouver les déviations observées par mes prédécesseurs, et en déterminer la cause exacte.

Pour y arriver, j'ai éliminé successivement de mon appareil toutes les différences de détail qu'il présentait avec les leurs; j'ai trouvé ainsi que, dans leurs expériences, le système astatique *aa* (*fig. 2*) se trouve séparé du disque tournant D par des plateaux fixes formés de secteurs d'étain 1 collés sur de l'ébonite ou du verre 2.

Dans mes expériences, le système *aa* (*fig. 3*) est séparé du disque par deux couches métalliques : laiton 1, étain 3, entre lesquelles se trouve la feuille de mica 2.

J'ai alors remplacé ces plateaux laiton, mica, étain, par des plateaux ébonite-étain. Dans ces conditions, j'ai obtenu des déviations réversibles à la fois avec le signe de la charge et le sens de la rotation du disque; leur sens coïncide avec celui que donnerait l'effet magnétique de la convection électrique.

C'est là le résultat de M. Rowland et de M. Himstedt. Mais le hasard de l'expérimentation m'a permis de constater que ces déviations disparaissent dès qu'on interpose une seconde couche métallique, parallèle et voisine de la couche d'étain, entre le disque et le système astatique.

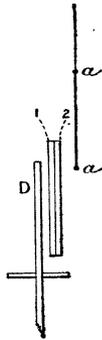


FIG. 2.

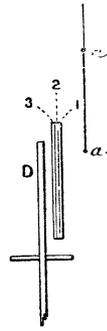


FIG. 3.

Ces déviations ne sont donc pas dues au champ magnétique du courant continu auquel équivaldrait la convection électrique. Une plaque métallique ne peut, en effet, ni diminuer ni supprimer l'action magnétique d'un courant continu, comme il est, du reste, facile de le vérifier dans mes expériences, à l'aide de la spire témoin.

D'autre part, l'ordre de grandeur de ces déviations s'accorde bien avec celui calculé pour la convection électrique, lorsque celles-ci seraient faibles; mais il n'augmente pas avec les conditions qui feraient croître cette convection.

Je n'ai pu, en effet, obtenir plus de 12 à 14 millimètres, alors même que la convection aurait dû donner 173 millimètres.

D'ailleurs, une étude approfondie de ces déviations m'amena à penser qu'elles étaient dues à des courants ouverts, circulant dans les secteurs d'étain fixes, par suite de la rotation des secteurs mobiles.

Mais le point intéressant, c'était qu'elles n'étaient pas dues à l'effet magnétique de la convection électrique.

Je crois donc pouvoir tirer cette conclusion :

*Un disque tournant, chargé dans des conditions telles qu'on est sûr qu'il entraîne bien avec lui sa charge, ne produit pas les effets ma-*

*gnétiques d'un courant de conduction transportant la même quantité d'électricité.*

M. Potier <sup>(1)</sup> fit alors l'objection suivante, qui a été répétée sous une forme un peu différente par M. Pocklington <sup>(2)</sup> :

Toutes les expériences précédentes prouvent seulement qu'une erreur s'était glissée dans les expériences de Rowland ; mais elles laissent entière la question de l'effet magnétique de la convection électrique.

En effet, dans les idées de Faraday et de Maxwell, cet effet magnétique résulterait du balayage de l'espace par les lignes de force électriques entraînées avec la charge du disque tournant. Mais, si ce disque tourne entre des armatures fixes, reliées au sol, l'espace balayé par les lignes de force se trouve limité justement à la portion du diélectrique comprise entre le disque et ses armatures ; il n'est donc pas étonnant que l'on n'observe rien en dehors de cette région.

Cette objection peut se discuter de bien des façons ; on peut en particulier faire remarquer que, si on se place dans les mêmes idées, on doit aussi admettre qu'un courant continu permanent ne produit ses effets magnétiques que par suite d'un balayage de l'espace par des lignes de force électriques. Or les écrans électriques les plus épais ne diminuent pas ces effets magnétiques.

Les écrans électromagnétiques, très bons conducteurs, retardent les effets magnétiques du courant, dans les périodes variables ; mais ils n'atténuent en rien les effets permanents.

Toutefois, je préfèrai répondre expérimentalement ; puisque le rôle des armatures fixes était de nature à rendre douteux les résultats obtenus, il n'y avait qu'à supprimer ces armatures.

Je fis alors l'expérience suivante :

Le disque d'ébonite D (*fig. 4*) des expériences précédentes est doré suivant 3 secteurs SS (*fig. 5*). Chaque secteur communique par une bande dorée avec un plot *p*, placé sur le moyeu M, dans un noyau d'ébonite. Les secteurs sont très soigneusement isolés les uns des autres. Chacun d'eux est, en outre, divisé par de petits traits radiaux de 2 millimètres de large, en une série de petits secteurs, communiquant seulement par leur partie interne, ainsi que le montre une partie du secteur  $S_1S_4$  (*fig. 5*).

(1) *Eclairage électrique*, t. XXV, p. 332 ; 1900.

(2) *Phil. Mag.*, mars 1901, p. 325.

La moitié inférieure du disque est comprise entre deux plateaux de verre C, C, fixés au bâti de bronze et recouverts, sur leurs faces externes, de papier d'étain relié au sol. Les dimensions sont telles que la capacité électrostatique C. G. S. d'un secteur SS compris entre ces deux plateaux est sensiblement égale à 140.

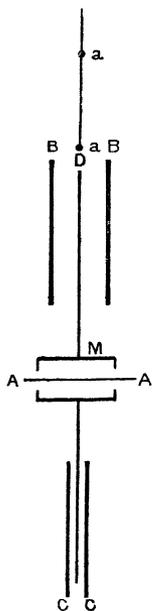


FIG. 4.

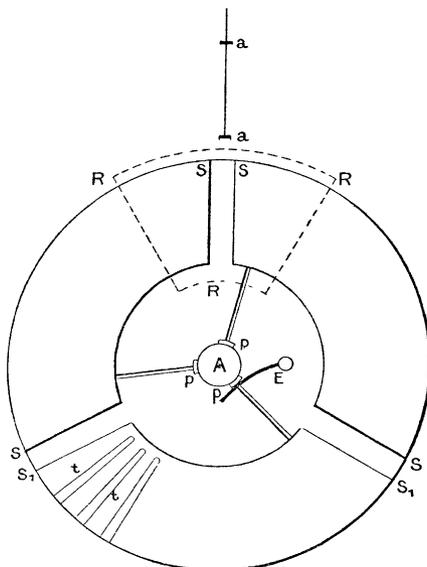


FIG. 5.

La moitié supérieure du disque est comprise entre deux plateaux d'ébonite B, B, recouverts d'étain sur leurs faces extérieures et distants du disque de 10 millimètres, de façon à pouvoir placer un système astatique au voisinage immédiat du disque et plus près de celui-ci que des plateaux fixes.

De plus, le papier d'étain qui recouvre ces plateaux a été enlevé suivant un secteur de  $60^\circ$  RRR, dont la bissectrice correspond à la région qu'on veut étudier avec le système astatique.

Un balai E permet de charger les secteurs; il est disposé de telle façon que chaque secteur se charge au moment où il est compris entre les plateaux inférieurs C, C. Il s'isole ensuite et vient agir sur le système astatique. Les sillons  $t$ ,  $t$  sont destinés à limiter les cou-

rants de conduction qui se produisent dans chaque secteur, par suite du passage de la grande capacité CC à la faible capacité BB.

Grâce à cette disposition, le secteur conservait toute sa charge, et venait agir sur le système astatique placé dans la région RR, où les secteurs métalliques fixes sont supprimés.

L'appareil avait aussi une spire témoin.

Le système astatique aurait dû ne pas être protégé par un écran électrique, pour être absolument à l'abri de l'objection de M. Potier.

J'essayai donc de supprimer, par symétrie, les effets électrostatiques directs du disque sur le système. Mais ce fut sans succès, et je dus interposer un écran. Dans une première expérience, cet écran était formé de papier graphité. Lorsque le disque était au repos, cet écran était parfaitement efficace.

Je fis alors l'expérience complète, et j'obtins des déviations reversibles à la fois avec le sens de la rotation et le signe de la charge.

En les étudiant de près, il me fut facile de voir qu'elles avaient une origine purement électrostatique. En particulier elles restaient identiques si *on supprimait les aiguilles aimantées sur la lame de mica du système astatique*.

Elles disparaissaient aussi, dans tous les cas, si on substituait à la couche de graphite de l'écran une couche de papier d'étain.

En même temps, je constatais, au moment de l'inversion de charge du disque, l'existence d'aigrettes très peu lumineuses, dont la production entraînait toujours de faibles déviations du système astatique.

Le résultat ainsi obtenu confirme donc les précédents. Il m'a, de plus, permis de retrouver deux autres causes d'erreur, qui ont pu tromper des expérimentateurs un peu disposés à admettre *a priori* la réalité de ce qu'ils voulaient vérifier.

Mais, de l'ensemble précédent, il semble bien résulter que la convection électrique ne produit pas d'effets magnétiques.

Il en résulte immédiatement qu'il doit exister des courants ouverts. On peut en effet maintenir par convection une différence de potentiel constante entre deux points reliés par un conducteur.

Tout le long de ce conducteur, il y aura un champ magnétique *dont les lignes de forces ne se fermeront pas*.

Il y avait intérêt à vérifier l'existence de pareils courants. J'ai alors fait, sur les conseils de M. H. Poincaré, l'expérience suivante :

Un disque en ébonite D (*fig. 6*), de 37 centimètres de diamètre et de 2<sup>mm</sup>,5 d'épaisseur, a été doré suivant 25 secteurs radiaux de 34 cen-

timètres de diamètre extérieur, 24 centimètres de diamètre intérieur, et distants les uns des autres de 10 millimètres.

Ce disque, mobile autour d'un axe horizontal, tourne entre deux plateaux fixes en ébonite, F et F'.

Le plateau F' porte un secteur d'étain S ayant mêmes rayons que les secteurs mobiles, mais deux fois plus large qu'eux.

En face de S et sur le plateau F se trouve un balai B, qui frotte sur les secteurs mobiles; B est relié à un second balai B', décalé d'environ 60° par rapport à B et placé aussi sur le plateau F.

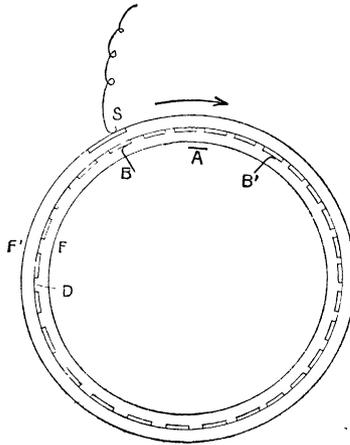


FIG. 6.

Si on fait tourner le disque D, puisqu'on relie le secteur S à une source électrique, les secteurs mobiles se chargeront par influence en passant au contact de B et viendront se décharger sur B'.

Il y aura donc, entre B et B', d'une part un courant de convection, d'autre part un courant de conduction.

Le potentiel en S est de 400 à 430 C. G. S. électrostatiques; la distance entre S et les secteurs mobiles, de 5 millimètres; la vitesse du disque, de 65 à 85 tours par seconde; la quantité d'électricité transportée par convection est de  $2 \times 10^{-4}$  à  $10^{-4}$  coulombs par seconde; et, par conséquent, le courant dans le fil BB' de  $2 \times 10^{-4}$  à  $10^{-4}$  ampères.

Entre les deux balais, au niveau du bord supérieur de la dorure du disque tournant, et à 15 millimètres en avant de celui-ci, on a

placé l'aiguille inférieure A d'un système astatique dont l'aiguille supérieure se trouve à 20 centimètres au dessus. Une spire conductrice de diamètre égal à celui de la partie moyenne de la dorure du disque tournant est fixée dans une position symétrique de cette région par rapport à l'aiguille inférieure du système.

Celui-ci est réglé de telle façon qu'un courant de  $10^{-4}$  ampères circulant dans cette spire témoin produit une déviation de 10 millimètres sur une échelle placée à 4 mètres de distance.

Le mode opératoire est le suivant :

Dans une première expérience, on relie les balais B et B' à un galvanomètre par des fils qui passent très loin du système A et sont d'ailleurs symétriquement placés par rapport à A, de façon que leur action magnétique s'annule. La seule partie du circuit qui pourrait agir sur A serait alors la convection entre B et B'. Dans ces conditions, le disque étant mis en rotation, si on vient à charger S, on observe une déviation du galvanomètre, tandis que le système A reste immobile.

D'ailleurs, la déviation du galvanomètre permet de mesurer l'intensité du courant réalisé.

Dans une deuxième expérience, les balais B et B' sont réunis par un fil de résistance égale à celle du galvanomètre collé sur le disque F. au niveau de la région moyenne de la partie dorée du disque tournant D.

On observe alors, au moment où on charge le secteur S, une déviation permanente du système A, qui cesse dès qu'on remet S au sol. La déviation observée est justement identique à celle que donne, sur A, un courant égal à celui mesuré dans l'expérience précédente et envoyé dans la spire témoin.

On a d'ailleurs vérifié que le sens des déviations du système A change avec le signe de la charge en S.

*Le courant qui circule entre B et B' est donc un courant ouvert.*

Je ferai observer, de plus, que la première partie de cette expérience constitue une forme très nette de transport d'électricité par convection, sans effet magnétique, dans laquelle la quantité d'électricité transportée est mesurée directement, ainsi que tous les autres facteurs de l'expérience.

La conclusion finale de toutes ces expériences est donc que *la convection électrique ne produit pas d'effet magnétique et qu'il existe des courants ouverts.*

Toutes les objections qu'on faisait à propos des premières expériences tombent en effet devant la dernière.

On avait fait observer, en particulier, que la rotation d'un disque chargé, quelle que soit la division en secteurs qu'on donne à sa dorure, n'apporte, dans la distribution électrique, aucun trouble comparable à celui qui accompagnerait, par exemple, le passage d'un boulet de canon chargé à travers l'espace. J'ai même essayé de réaliser un transport d'électricité par un procédé de ce genre. Je chargeais, par influence, des grains de sable entraînés à grande vitesse par un courant de gaz carbonique. Mais je n'ai pu arriver à transporter ainsi plus de  $10^{-7}$  coulombs par seconde, c'est-à-dire trop peu pour pouvoir espérer voir les effets magnétiques, s'ils existaient. Cette expérience a été tentée avant les deux dernières, faites avec des disques tournants.

Mais la dernière lui est absolument comparable. Les petits secteurs, complètement isolés, qui forment, dans leur rotation, la branche convection du courant ouvert, sont exactement comparables à des corps chargés, et je ne vois pas la différence qu'il peut y avoir entre les effets de leur mouvement dans l'espace et ceux du déplacement d'un projectile quelconque. Il n'y a ici ni armature fixe, ni même cette sorte de continuité, de symétrie autour d'un axe qu'on reprochait aux dispositions précédentes. Il n'y a jamais de chargée qu'une faible partie des secteurs qui couvrent le disque.

En ce qui concerne l'effet magnétique de la convection électrique, la question semble donc bien résolue par la négative.

Le problème qui se pose actuellement porte tout entier sur la contradiction qui résulte de la notion même de courants ouverts et que les équations rappelées au début de cet article font ressortir d'une manière tout à fait nette.

Guidé par les conseils de M. H. Poincaré, j'ai entrepris une étude détaillée des courants ouverts, dont j'espère publier bientôt quelques résultats.

Mais on ne saurait affirmer, à l'avance, que c'est de cette étude que sortira la solution du problème. On ne peut la faire, en effet, qu'en se guidant sur ce qui a été fait pour les courants fermés, et en recherchant des différences.

Or, tout ce qu'on sait sur les courants fermés cadre assez bien avec la conception qu'on se faisait de la nature de la conduction.

Peut-être est-ce plutôt à des notions expérimentales plus justes,

sur la nature de ce que nous appelons électricité ou électrisation, qu'il faudrait s'adresser tout d'abord. Une idée plus exacte du phénomène de la conduction en sortirait certainement, qui permettrait de résoudre plus sûrement le problème qu'une adaptation d'idées anciennes fort probablement erronées.

---