

ANNALES SCIENTIFIQUES DE L'É.N.S.

L. MOUTON

Étude expérimentale sur les phénomènes de l'induction électrodynamique

Annales scientifiques de l'É.N.S. 2^e série, tome 6 (1877), p. 193-264

http://www.numdam.org/item?id=ASENS_1877_2_6__193_0

© Gauthier-Villars (Éditions scientifiques et médicales Elsevier), 1877, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales scientifiques de l'É.N.S. » (<http://www.elsevier.com/locate/ansens>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE
SUR LES
PHÉNOMÈNES D'INDUCTION ÉLECTRODYNAMIQUE,

PAR M. L. MOUTON,
AGRÉGÉ PRÉPARATEUR A L'ÉCOLE NORMALE.

HISTORIQUE.

La reprise de l'étude, au point de vue statique, des phénomènes présentés par les piles a, sinon enfanté, du moins justifié, éclairci et étendu le système théorique auquel on en rattache aujourd'hui l'ensemble. On peut donner plusieurs raisons pour expliquer l'abandon dans lequel furent laissées, surtout en France, ces études statiques dont le génie de Volta avait su tirer un si merveilleux parti : d'abord les difficultés d'un maniement précis des électroscopes à feuilles d'or ou à pailles qu'avait employés Volta ; en second lieu, le peu d'importance pratique de ces phénomènes devant les prodigieux effets que produisait coup sur coup la pile fermée ; et enfin surtout le manque de netteté théorique qu'offrait aux esprits élevés à l'école de Coulomb cette tension que Volta transmettait par communication immédiate, sans se soucier de la forme géométrique des corps, qui paraissait appartenir aussi bien à l'intérieur qu'à la surface des conducteurs, sorte de température électrique complètement ignorée de Coulomb, et où Volta avait été conduit par les voies impénétrables du génie ⁽¹⁾.

(¹) Ces lignes étaient écrites quand j'ai lu, dans la Préface du *Traité d'électricité statique* de M. Mascart (Paris, 1876), le nom de *tension de Volta* donné au potentiel. Les expres-

Si l'on veut une preuve de ce que j'avance, que l'on voie comment Biot faisait l'expérience classique destinée à mettre en évidence la tension électrique de la lame de cuivre mise en contact avec une lame de zinc tenue à la main; au lieu de mettre pendant le contact la lame de cuivre en communication avec l'un des plateaux de l'électroscope, il la séparait de celle de zinc, puis allait la décharger à l'électroscope, et recommençait. « Après sept ou huit contacts de ce genre, dit-il, si l'on enlève le plateau supérieur du condensateur, les pailles divergent très-fortement en vertu de l'électricité déposée dans le plateau inférieur par les contacts successifs du disque métallique ⁽¹⁾. »

Il est bien curieux de voir comme Ampère sépare nettement ces deux manifestations, statique et dynamique, de l'électricité, essaye de les relier l'une à l'autre, mais est obligé de se tenir dans des généralités insaisissables au calcul à cause de la complexité de cette tension, mesurée par des attractions et des répulsions, qu'il a seule dans la pensée.

« L'action électromotrice, dit-il, se manifeste par deux sortes d'effets que je crois devoir d'abord distinguer par une définition précise : j'appellerai le premier *tension électrique*, le second *courant électrique*..... Dans le second cas, il n'y a plus de tension électrique, les corps légers ne sont plus sensiblement attirés, et l'électromètre ordinaire ne peut plus servir à indiquer ce qui se passe dans le corps; cependant l'action électromotrice continue d'agir; car, si de l'eau par exemple, un acide, un alcali ou une dissolution saline font partie du circuit, ces corps sont décomposés..... Mais ces effets cessent dès qu'on interrompt le circuit, que les tensions se rétablissent, et que les corps légers sont de nouveau attirés, ce qui prouve bien que ces tensions ne sont pas cause de la décomposition de l'eau, etc.

» Lorsque les deux corps ou les deux systèmes de corps, entre lesquels l'action électromotrice a lieu, sont en communication par des corps conducteurs entre lesquels il n'y a pas une autre action électro-

sions *tension de Coulomb*, *tension de Volta*, qui peuvent se définir d'une façon purement expérimentale, ne seraient pas seulement un hommage rendu à de grands noms, mais pourraient peut-être lever les scrupules des physiciens qui hésitent, non sans raison, à emprunter au calcul des considérations *à priori*.

⁽²⁾ Biot, *Traité de Physique expérimentale et mathématique*, Paris, 1816; t. II, p. 471.

motrice égale et opposée à la première, ce qui maintiendrait l'état d'équilibre électrique et, par conséquent, les tensions qui en résultent, ces tensions disparaissent ou du moins deviennent très-petites, et il se produit les phénomènes indiqués ci-dessus comme caractérisant ce second cas. Mais, comme rien n'est d'ailleurs changé dans l'arrangement des corps entre lesquels se développait l'action électromotrice, on ne peut douter qu'elle ne continue d'agir; et, comme l'attraction mutuelle des deux électricités, mesurée par la différence des tensions électriques, qui est devenue nulle ou a considérablement diminué, ne peut plus faire équilibre à cette action, on est généralement d'accord qu'elle continue à porter les deux électricités dans les deux sens où elle les portait auparavant, en sorte qu'il en résulte un double courant, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, partant en sens opposés des points où l'action électromotrice a lieu et allant se réunir dans la partie du circuit opposée à ces points. Les courants dont je parle vont en s'accéléralant jusqu'à ce que l'inertie des fluides électriques et la résistance qu'ils éprouvent par l'imperfection même des meilleurs conducteurs fassent équilibre à la force électromotrice, après quoi ils continuent indéfiniment avec une vitesse constante tant que cette force conserve la même intensité; mais ils cessent toujours à l'instant où le circuit vient à être interrompu. C'est cet état de l'électricité dans une série de corps électromoteurs et conducteurs que je nommerai, pour abréger, *courant électrique* (1). »

Que la tension, dont le nom revient si souvent dans ce passage, soit celle de Volta, et cette page magnifique, que je n'ai pu m'empêcher de citer tout entière, contient toute la théorie mathématique que M. Kirchhof a donnée vingt-neuf ans plus tard (2).

Mais c'est dans le Mémoire même dont j'ai extrait les lignes qui précèdent qu'Ampère donne à l'instrument nouveau, basé sur la récente expérience d'Ørstedt, son nom de *galvanomètre*, instrument dont la sûreté et la commodité pour l'étude du courant vont faire complètement abandonner les recherches statiques.

Il a fallu la justification expérimentale des lois si singulièrement

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2^e série, t. XV, p. 59 (1820).

(2) *Poggendorff's Annalen*, Band. LXXVIII, Seit. 506 (1849).

établies par Ohm ⁽¹⁾, puis les travaux mathématiques des Green, des Maxwell, des Thomson, pour remettre en honneur les études statiques, amener la création de nouveaux électromètres ou le perfectionnement des anciens, et finalement édifier la belle théorie mathématique de M. Kirchhof ⁽²⁾.

J'ai cru devoir tracer ces quelques lignes de l'histoire des piles, parce que c'est à elle que je dois rapporter l'idée du travail qui va suivre, et que, d'ailleurs, elle me paraît éclairer celle des phénomènes d'induction d'un jour particulier.

Quand Faraday les découvrit en 1831 ⁽³⁾, le galvanomètre était le seul instrument dont on se servit avec les piles ou autour d'elles. Aussi l'illustre physicien anglais n'étudia-t-il l'action inductrice qu'en tant que produite dans un circuit fermé renfermant un galvanomètre. Il examina du reste les différents modes de production de cette action, constituant les importants chapitres de cette grande science. Je ne signalerai, parmi les nombreux travaux dont cette découverte fut le point de départ, que ceux qui se rapportent spécialement à l'induction produite par l'établissement ou la rupture du courant inducteur.

Dans un Mémoire sur l'extra-courant, Masson ⁽⁴⁾ appelle l'attention sur l'étincelle et les effets physiologiques produits par l'induction. C'est

⁽¹⁾ Une des plus curieuses individualités que présente l'*Histoire des piles* est celle de Ohm. En reprenant la tension de Volta, c'est-à-dire en accordant à l'électricité des propriétés si complètement en désaccord avec les idées que l'on avait alors de ce fluide, a-t-il obéi comme Volta à l'intuition d'un génie que le reste de ses écrits ne justifierait peut-être pas suffisamment, ou bien, disciple de Fourier, a-t-il voulu simplement, en calquant ce grand maître, faire une de ces études *a priori* qu'affectionnent les Allemands? Il y aurait là un sujet d'étude assez tentant, ..., si Ohm était un Français.

⁽²⁾ Outre le Mémoire cité plus haut, voir l'analyse qu'en a donnée Verdet dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. XLI, p. 496; aussi *Œuvres de Verdet, Conférences de Physique faites à l'École Normale*, publiées par M. Gernez, première Partie, p. 329. — BRIOT, *Théorie mécanique de la chaleur*, Paris, 1869, p. 259.

⁽³⁾ Les recherches de Faraday sur ce sujet ont été lues le 24 novembre 1831 à la Société royale de Londres; une lettre de Faraday à M. Hachette, lui annonçant ses expériences, fut traduite et lue à l'Académie des Sciences de Paris, le 26 décembre 1831; une copie en fut imprimée dans le *Temps* du 28 décembre. La lecture de Faraday est imprimée dans les *Philosophical Transactions of the royal Society of London* de l'année 1832, p. 125 et suiv., sous le titre : *Experimental researches in electricity*; une traduction en a été donnée aux *Annales de Chimie et de Physique*, t. L, 2^e série (1832).

⁽⁴⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 2^e série, t. LXVI (1837).

à propos de cette étude qu'il imagine une roue interruptrice destinée à multiplier les effets, première ébauche des rhéotropes, interrupteurs, disjoncteurs, etc., qui furent depuis à peu près universellement employés dans les recherches sur l'induction.

De 1835 à 1840 parurent les importants travaux de M. Henry, de Princeton, sur les courants induits d'ordre supérieur ⁽¹⁾. Ce physicien se servit comme moyen d'investigation de l'aimantation produite par les courants induits sur de petites aiguilles d'acier.

M. Abria a donné un résumé des travaux de M. Henry ⁽²⁾. C'est là que se trouvent développées les considérations théoriques devenues classiques pour expliquer le mécanisme de l'induction ⁽³⁾.

Dans ces explications figurent à chaque instant les mots *quantité*, *intensité*, *tension*, pour désigner des fonctions qu'il est malheureusement difficile, non pas peut-être de définir théoriquement, mais de rendre directement et sûrement, surtout pour ce qui est des dernières, accessibles à des mesures directes. L'introduction de telles locutions dans les sciences expérimentales entraîne souvent de fâcheuses conséquences, et le cas actuel en est une preuve. Pour ne citer qu'un exemple, que signifient les expressions *décharge de quantité* et *décharge de tension*, *courant de quantité* et *courant de tension*, qu'il n'est pas rare de rencontrer dans les travaux qui nous occupent?

Les définitions théoriques qui semblent ressortir le plus nettement des Mémoires des physiciens qui ont employé ces termes sont les suivantes, que j'emprunte textuellement à M. Bertin ⁽⁴⁾:

« Lorsque le courant est constant (formule $I = \frac{E}{R}$), la quantité d'électricité transportée dans un certain temps θ est $I\theta$; et, si le temps est égal à 1, cette quantité est I , de sorte que les mots *intensité* et *quantité* peuvent être pris l'un pour l'autre dans ce cas, mais seulement

⁽¹⁾ *Transactions of the american philosophical Society*, années 1835 et suiv. — *Philosophical Magazine*, mars, avril et juillet 1840.

⁽²⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. III, p. 394 et suiv. (1841).

⁽³⁾ VERDET, *OEuvres, Conférences faites à l'École Normale*, publiées par M. Gernez, première Partie, p. 390. — JAMIN, *Cours de Physique de l'École Polytechnique*, 2^e édition (1869); t. III, p. 283, 287. — GAVARRET, *Traité d'électricité*, t. II, p. 220 (1858).

⁽⁴⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, t. XXII, 4^e série (1871). — *Revue des travaux de Physique publiés à l'étranger*, p. 487.

dans ce cas. Si, au contraire, le courant est variable, l'intensité l'est aussi; c'est à chaque instant la quantité d'électricité que le courant transporterait par seconde, s'il restait indéfiniment dans l'état où il est à cet instant-là. Mais cet état, au lieu d'être constant, ne dure qu'un temps infiniment petit dt ; si donc on désigne par i l'intensité au temps t , la quantité d'électricité transportée dans le temps dt sera $i dt$, et la quantité totale sera $q = \int i dt$, en étendant cette intégrale à toute la durée du courant.

» On peut chercher à représenter les variations du courant par une courbe dont l'abscisse serait le temps et l'ordonnée l'intensité; la quantité du courant serait l'aire de la courbe, et la tension serait caractérisée par l'intensité maximum. Ainsi, en résumé, quand on sera parvenu à tracer la courbe des courants induits, en prenant pour abscisse le temps et pour ordonnée l'intensité, la tension sera indiquée par l'ordonnée maximum, et la quantité sera représentée par l'aire de la courbe. »

Au point de vue théorique, on peut objecter à ces définitions que le I de Ohm est indépendant non-seulement du temps, mais du point considéré du circuit. En est-il de même du i variable à un moment donné? Que deviennent alors les définitions qui précèdent? Et en supposant ce point éclairci, que de difficultés dans la traduction des données expérimentales pour les amener à exprimer les fonctions qui viennent d'être définies! Que d'à peu près dont la conséquence est une discordance complète des résultats obtenus par divers expérimentateurs!

Ce fut M. Abria qui rechercha le premier « les lois des courants d'induction », ainsi qu'il le dit lui-même au début de son premier Mémoire ⁽¹⁾. Comme M. Henry, il se sert de l'aimantation d'aiguilles d'acier, trouvant que « le galvanomètre n'est pas, pour la sensibilité, comparable au procédé d'aimantation ». « Ce moyen de comparaison, dit M. Pouillet ⁽²⁾, ne peut pas sans doute donner des rapports d'intensité parfaitement rigoureux; mais il conduit du moins à des ap-

⁽¹⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. III (1841), p. 5.

⁽²⁾ *Éléments de Physique expérimentale et de Météorologie*, 7^e édition (1856), t. I, p. 725.

proximations qu'il faut bien accepter, en attendant que l'on trouve une méthode plus sûre. »

M. Abria étudie successivement l'influence du nombre de tours du fil inducteur, de la distance, de la section et de la conductibilité du fil induit.

Dans un second Mémoire (¹), il étudie les effets désignés habituellement sous le nom d'*influence des diaphragmes*, et les explique, comme on le fait encore, par les courants induits d'ordre supérieur; puis, constatant la différence des effets généraux, selon qu'on les mesure au galvanomètre ou à l'aimantation, il passe à l'étude des « autres effets physiologiques, calorifiques, lumineux ou chimiques que peuvent produire les courants d'induction ».

Préoccupé d'étudier l'état électrotonique (*electro-tonic state*) par lequel Faraday (²) avait tenté d'abord d'expliquer les phénomènes de l'induction, Marianini (³) essaye de ne fermer le circuit induit qu'à des temps variables après la fermeture du courant inducteur. Il trouve qu'au bout de $\frac{1}{2}$ seconde il n'obtient plus aucun phénomène de courant; mais, si le temps qui sépare les deux fermetures est moindre que $\frac{1}{2}$ seconde, il obtient au fil induit une déviation plus faible, mais toujours de même sens que celle de Faraday. Ce dernier résultat est en contradiction avec celui qu'ont obtenu, dans des expériences analogues, M. Blaserna et M. Bernstein, vingt-cinq ans plus tard. Le phénomène oscillatoire se traduit, dans ce cas, par des changements de sens du courant, qui paraissent avoir échappé à Marianini.

En 1841, MM. Masson et Bréguet fils présentent à l'Académie des Sciences un important Mémoire (⁴) dans lequel leur principale préoccupation paraît être d'amener une assimilation entre les phénomènes de l'induction et ceux de l'électricité statique. Ils étudient en un mot les phénomènes de tension (*Spannungsercheinungen*, comme disent les

(¹) *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. VII (1843), p. 462.

(²) *Philosophical Transactions*, déjà cité, p. 139.

(³) *Mémoire sur le courant qui se produit dans un circuit métallique fermé, quand on arrête le courant voltaïque qui circule près de ce fil*, par M. Marianini. Lu à la réunion des savants italiens à Florence en 1841, traduit par M. Usiglio dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. XI (1844), p. 395.

(⁴) *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. IV (1842), p. 129.

Allemands) produits par l'induction, la tension étant ici mesurée par la distance à laquelle se produisent les étincelles qui doivent fermer le circuit, et la force de celles-ci.

C'est pour multiplier et séparer les effets qu'ils perfectionnent la première roue interruptrice de Masson, et construisent leur rhéotrope devenu classique. Ce Mémoire créait le bel appareil si grandement réalisé depuis par M. Ruhmkorff. MM. Masson et Bréguet y mettent en évidence la propriété du courant induit de rupture, de franchir un espace que ne saurait traverser celui de fermeture, ou, comme on le dit, la différence de tension de ces deux courants, et en tirent le moyen de les séparer aisément.

Il y a une expérience relatée dans ce Mémoire dont je voudrais dire quelques mots. Les auteurs font communiquer les extrémités du fil induit avec les plateaux d'un électroscope condensateur, et constatent que, si la tension est suffisante, il part des étincelles entre ces plateaux, ce qui n'a rien de surprenant. Mais ils n'ajoutent pas ce que deviennent les feuilles d'or de l'électroscope dans le cas où les étincelles ne partent pas, et où ces feuilles sont là, par conséquent, le seul indicateur des phénomènes électriques dont les plateaux sont le siège. Dans un Mémoire sur les appareils d'induction, M. Poggendorff⁽¹⁾ dit à ce sujet ce qui suit :

« Lorsque les deux extrémités du fil induit sont séparées par une substance isolante, aucun phénomène ne se produit, du moins lorsque ces extrémités sont des fils métalliques de dimensions ordinaires. Il n'en est pas de même lorsque ce sont deux plaques d'une certaine étendue, séparées par la lame non conductrice. Les deux bouts du circuit induit se trouvent alors en communication avec les deux armatures d'un véritable condensateur, et il se produit des phénomènes remarquables. Le condensateur se charge sous l'influence de chaque courant induit, et se décharge immédiatement après par le fil induit lui-même, de façon qu'on ne peut jamais constater une accumulation sensible d'électricité sur le condenseur. »

Et, en effet, si ce condenseur fait partie d'un électroscope à feuilles

(¹) *Poggendorff's Annalen*, t. XCIV, p. 289. Un extrait de ce Mémoire a été inséré par Verdet dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. XLIV, p. 375.

d'or, et qu'on laisse en contact les extrémités du fil induit avec les plateaux, on constate à chaque interruption du courant inducteur une divergence très-faible, ou, pour mieux dire, une tendance à une divergence aussitôt réprimée. Il me semble qu'on peut voir là la preuve du phénomène oscillatoire dont le fil induit est alors le siège. Si, en effet, l'extrémité du fil reliée au plateau inférieur de l'électroscope se trouvait portée par l'induction à un certain potentiel retombant simplement à zéro sans changer de signe, il se produirait là un effet de percussion mécanique que manifesterait l'écartement des feuilles; il est probable, en effet, que la durée de cette percussion est comparable, sinon égale, à celle qui, lorsque le circuit induit est fermé, fait dévier les aiguilles beaucoup plus lourdes d'un galvanomètre. Du reste, quelque courte que soit cette durée, on peut toujours augmenter les effets de façon que les intégrales qui déterminent les composantes de la quantité de mouvement que possèdent les feuilles après la percussion ⁽¹⁾ aient une valeur aussi grande qu'on le veut. Le fait de l'immobilité de ces feuilles paraît donc inexplicable; mais si, comme le fait observer M. Thomson ⁽²⁾, on remarque que les feuilles d'or de l'électroscope divergent par suite de la différence de potentiel qui existe entre elles et les corps solides entourant l'espace dans lequel elles se meuvent, le mouvement à peu près nul de ces feuilles, dans l'expérience qui précède, indique qu'elles demeurent à un potentiel moyen aussi à peu près nul; ce qui, vu l'énergie des tensions électriques si fortes que prouve la production d'étincelles, ne peut s'expliquer que par une succession rapide dans les feuilles de potentiels à peu près égaux et de signe contraire deux à deux.

Je signalerai encore les Mémoires de M. Wartmann ⁽³⁾ et l'intéressante étude de tous les disjoncteurs et rhéotropes employés jusque-là, qui précède le Mémoire du tome XXII; la méthode si originale de la balance électrodynamique employée par M. Lallemand ⁽⁴⁾, pour établir les lois des courants induits et leur analogie avec les courants ordinaires au point de vue des propriétés électrodynamiques; le Mémoire

⁽¹⁾ Voir DUHAMEL, *Cours de Mécanique*, 3^e édition (1863), t. II, p. 82.

⁽²⁾ *Reprint of Papers on electrostatics and magnetism*, London, 1872, p. 260.

⁽³⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. XIX, XXII et XXIV.

⁽⁴⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. XXXII (1851).

dans lequel M. Riccardo Felici ⁽¹⁾ recherche, par une méthode analogue à celle d'Ampère, la loi élémentaire de l'action de deux éléments de circuits fermés dont l'un est traversé par un courant brusquement interrompu; les Mémoires de M. Perrot ⁽²⁾ sur l'étincelle d'induction, dont les phénomènes oscillatoires pourraient peut-être bien un jour expliquer la complexité; le travail de M. Seguin ⁽³⁾ sur l'analogie de l'étincelle d'induction avec les autres décharges électriques, etc.

J'arrive enfin aux travaux qui ont établi, dans toutes ces décharges, l'existence de phénomènes oscillatoires.

En 1847, dans son célèbre Mémoire sur la conservation de la force, M. Helmholtz disait : « ... Vorsselman de Heer et Knochenhauer ont démontré que le dégagement de chaleur mesuré par Riess, correspondant à la même charge d'une même batterie, est le même, quelles que soient les variations du fil de réunion... Cette loi se comprend facilement pourvu que la décharge d'une batterie ne soit pas représentée comme un simple mouvement de l'électricité dans une direction, mais comme une série d'oscillations entre les deux armatures, oscillations qui deviennent toujours plus petites, jusqu'à ce que la force vive soit éteinte par l'ensemble des résistances ⁽⁴⁾. »

Une analyse de M. W. Thomson, publiée en 1855 ⁽⁵⁾, établit l'équation générale différentielle du mouvement électrique dans le fil qui réunit deux conducteurs de potentiels différents, et, en l'intégrant, conduit à une expression de l'intensité du courant qui circule dans ce fil, tantôt de la forme d'une exponentielle, tantôt de fonctions périodiques du temps qui justifient la conception d'Helmholtz.

Le premier travail expérimental qui soit venu sanctionner ces conclusions théoriques est de M. Feddersen. Il a publié les premiers résultats de ses recherches en 1857 ⁽⁶⁾; il a envoyé aux *Annales de Chimie*

⁽¹⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. XXXIV (1852), p. 64.

⁽²⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. LXI, p. 161 et 200.

⁽³⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. LXIX, p. 97.

⁽⁴⁾ *Erhaltung der Kraft*, Berlin, 1847, p. 44. Une traduction française en a été publiée chez Masson (1869), par M. Louis Pérard. Voir p. 106 et 107.

⁽⁵⁾ *Philosophical Magazine*, 4^e série, t. V, p. 393. — WIEDEMANN, *Die Lehre von Galvanismus und Electromagnetismus*, 2^e édition (1874), t. II, 2^e Partie, p. 121.

⁽⁶⁾ *Poggendorff's Annalen*, t. CIII, p. 69; un extrait de ce Mémoire a été donné par Verdet aux *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. LIV (1858), p. 435.

et de Physique, en 1863 ⁽¹⁾, un Mémoire complet résumant ceux qui avaient été insérés dans les années 1859 et 1861 aux *Annales de Poggendorff* ⁽²⁾.

La méthode de Feddersen consiste à faire éclater l'étincelle d'une batterie (de préférence entre des électrodes en zinc), et à en amplifier l'image au moyen du miroir tournant de Wheatstone, à axe de rotation parallèle à la ligne des électrodes. Dans les premières expériences, le miroir était plan, dans les secondes il était concave, et Feddersen put examiner sur un verre dépoli et même photographier, en la recevant sur une plaque collodionnée, l'image réelle amplifiée de l'étincelle. Des effluves lumineuses, partant alternativement de l'une et de l'autre électrode, caractérisaient ce que l'auteur appelle la décharge oscillante, dans laquelle, dit-il, « la décharge de la batterie oscille d'une armature à l'autre avec une intensité graduellement décroissante. Elle se produit d'une manière particulièrement nette avec les plus faibles résistances du circuit; cependant, même avec des résistances moyennes, on la voit ordinairement apparaître. On peut donc dire que toutes les fois qu'on détermine une décharge à travers un circuit fermé par un fil métallique, on doit tout d'abord supposer que la décharge se fait de cette manière. »

M. Paalzow ⁽³⁾ appliqua la même méthode du miroir tournant à l'étude de la décharge d'une batterie à travers un tube de Geissler. Il constata l'alternance du phénomène par l'apparition successive de la teinte bleue aux deux extrémités du tube, et par le dédoublement des courants sous l'influence d'un aimant qui les amenait, les uns contre un bord, les autres contre l'autre bord du tube, selon le sens suivant lequel ils le parcouraient.

Enfin, M. von Oettingen ⁽⁴⁾ constata également l'alternance en faisant passer les décharges successives de la batterie à travers un galvanomètre.

Une bobine d'induction dont on n'utilise que le courant direct pou-

⁽¹⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. LXIX (1863), p. 178.

⁽²⁾ *Pogg. Ann.*, CVIII, p. 497 (1859); CXII, p. 452; CXIII, p. 437; CXVI, p. 132 (1861). Voir aussi WIEDEMANN, *loc. cit.*, p. 125.

⁽³⁾ WIEDEMANN, *loc. cit.*, p. 126.

⁽⁴⁾ WIEDEMANN, *loc. cit.*, p. 126.

vant charger un condensateur, il était naturel que l'on s'en servit dans l'étude des phénomènes qui nous occupent, et l'on y trouvait en plus l'avantage d'avoir dans le fil même, dont les extrémités avaient apporté la charge à la batterie, le conducteur par lequel devait s'effectuer la décharge. C'est ainsi qu'opéra M. Helmholtz⁽¹⁾. Les deux armatures d'une batterie étaient en communication avec les extrémités d'une spirale d'induction; une lourde masse en tombant produisait d'abord la rupture du courant inducteur, par suite la charge de la batterie, puis un temps connu après cette rupture amenait la séparation de la spirale des armatures de la batterie, et la mise en communication de celles-ci avec les nerfs d'une grenouille fraîchement écorchée, dont les contractions indiquaient le sens de la décharge à l'instant considéré.

C'est dans ce travail, entrepris pour étudier la décharge d'un condensateur, que M. Helmholtz remarqua qu'en enlevant ce condensateur, et reliant au sol l'une des extrémités de la spirale induite pendant que l'autre était isolée, le fil était de même le siège d'un mouvement oscillatoire.

Ce fait nouveau avait déjà été aperçu par Blaserna⁽²⁾. Cherchant à apprécier la durée des courants d'induction, ce physicien avait été conduit à rendre de plus en plus courte la durée du contact, qui, dans le rhéotrope genre Masson et Bréguet, fermait ces courants en les lançant dans le fil d'un galvanomètre; et il avait vu l'aiguille de ce galvanomètre prendre des déviations de sens différents selon l'instant où s'opérait cette fermeture. Son appareil éprouvant des vibrations capables de mettre en doute la rigueur des résultats, la question fut reprise par une méthode identique par M. Bernstein⁽³⁾.

L'une des extrémités de la bobine d'induction étant constamment en relation avec le sol et une des bornes d'un galvanomètre, l'autre extrémité se trouvait reliée à l'autre borne à des instants variables et connus après la rupture du courant inducteur, et pendant des temps excessivement courts. Le sens de la déviation de l'aiguille indiquait alors la

⁽¹⁾ WIEDEMANN, *loc. cit.*, p. 128.

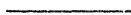
⁽²⁾ *Archives des Sciences physiques et naturelles*, nouvelle série, t. XXXVIII, p. 338 (1870).

⁽³⁾ *Pogg. Ann.*, t. CXLII, p. 54 (1871). — WIEDEMANN, *loc. cit.*, p. 129. — *Journal de Physique* de M. d'Almeida, t. I, p. 77 (1872).

direction du courant qui, à cet instant, parcourait le fil de la bobine. Pour éviter les vibrations des pièces frottantes qu'on pouvait reprocher à M. Blaserna, M. Bernstein employa un mode de fermeture de courant consistant dans le glissement de deux pointes sur des rigoles de mercure dépassant un peu le sol par le fait de la capillarité; en quittant le mercure, les pointes produisaient la rupture du courant inducteur. Jusqu'à quel point peut-on, dans de telles conditions, affirmer l'identité des diverses ruptures ou fermetures, et, par suite, la constance de l'origine des phénomènes dans toute une série d'expériences? Je n'ai pas à discuter cette question. Dans tous les cas, cette difficulté d'ordre tout pratique laissée de côté, M. Bernstein pouvait bien saisir les zéros de la courbe générale des différences de tension successives par lesquelles passaient les extrémités du fil induit, en admettant encore que la communication de l'une d'elles au sol ne modifiât en rien les phénomènes; mais il lui était impossible d'obtenir avec quelque exactitude la valeur correspondant à aucun autre point de la courbe, résultat que, du reste, il ne paraît pas avoir eu pour but de poursuivre.



INTRODUCTION.



Je me proposais simplement, au début de ce travail, d'étudier la différence de potentiel produite par le fait de l'induction aux deux extrémités, complètement séparées et isolées, du fil d'une bobine induite. Je pris dans ce but un électromètre de M. W. Thomson, à quadrants suffisamment grands et espacés, dont l'aiguille était maintenue chargée par sa communication avec le pôle positif d'une pile ouverte. L'appareil d'induction était une petite bobine en construction dans les ateliers de MM. Ducretet et C^{ie} (¹), sans trembleur ni fer à l'intérieur,

(¹) Je profite de la première occasion pour remercier ces Messieurs de la complaisance avec laquelle ils ont constamment mis à ma disposition les ressources de leurs ateliers pendant tout le temps qu'a duré ce travail.

et je crus qu'il suffisait simplement, pour me borner, par exemple, au cas de la rupture du courant inducteur, de mettre lors de cette rupture les deux extrémités du fil induit en communication avec les deux couples de quadrants de l'électromètre. J'essayai d'abord d'un disjoncteur automatique, dans le genre de l'interrupteur Foucault, employé déjà par M. Bertin dans son étude « sur les propriétés des courants interrompus ⁽¹⁾ ». Quand le courant inducteur se rompait par la sortie d'une pointe d'un godet de mercure, deux autres pointes soigneusement isolées l'une de l'autre et reliées aux extrémités de la bobine induite plongeaient dans d'autres godets en communication avec les quadrants de l'électromètre. Dans ces conditions, le résultat fut le plus souvent nul; parfois néanmoins une brusque secousse, tantôt d'un sens, tantôt de l'autre, était imprimée à l'aiguille.

Me défiant des mouvements du mercure des godets, j'eus recours aux disjoncteurs à pièces solides, et je me servis à la manière ordinaire d'un rhéotrope Masson et Bréguet, que possède le cabinet de Physique de l'École Normale. Le résultat fut absolument le même que le précédent. A quoi tenait cet insuccès d'une expérience classique, dans laquelle je remplaçais simplement le galvanomètre par un électromètre? Je me laissai guider par les considérations suivantes : lorsque les fluides ébranlés par l'induction ont parcouru le fil du galvanomètre, il n'est que meilleur certainement qu'ils retrouvent le chemin du fil induit d'où ils sont partis, pour achever de se neutraliser; dans le cas de l'électromètre, au contraire, il doit y avoir intérêt, les fluides une fois lancés dans les quadrants, à isoler ceux-ci du fil de la bobine qui ne ferait que les mettre en communication métallique, et, par suite, les ramener au même potentiel. Et j'avais remarqué, en effet, que l'aiguille de l'électromètre n'avait subi de secousse que dans quelques cas où la communication des extrémités du fil induit avec les secteurs avait cessé presque à l'instant de la rupture du courant inducteur. La suite de cette étude rectifiera le raisonnement précédent et expliquera le phénomène. Je fus ainsi amené à construire un instrument dans lequel pût être excessivement courte la durée des communications du fil induit avec les quadrants. Dans ce cas encore de nombreuses irrégularités

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4^e série, t. XV.

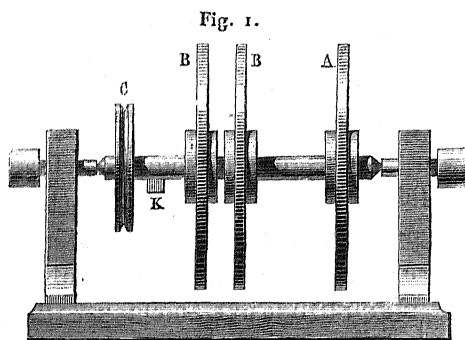
me firent penser que la différence de potentiel que je me proposais d'apprécier ne devant pas naturellement prendre brusquement sa valeur maximum, je devais chercher à produire ces communications rapides à tous les instants qui suivent la rupture métallique du courant inducteur. C'est alors que le phénomène oscillatoire me fut nettement révélé et que des mesures purent se faire.

Ce travail sera partagé en deux Parties : la première contiendra la description des différents appareils dont j'ai fait usage; dans la seconde, je discuterai la méthode employée et j'exposerai les résultats qu'elle a fournis.

PREMIÈRE PARTIE.

DESCRIPTION DES APPAREILS. — DISJONCTEUR. — MOTEUR. — RÉGULATEUR. — INSCRIPTEUR DU MOUVEMENT. — ÉLECTROMÈTRE ET SA GRADUATION. — APPAREILS D'INDUCTION. — COURANT INDUCTEUR.

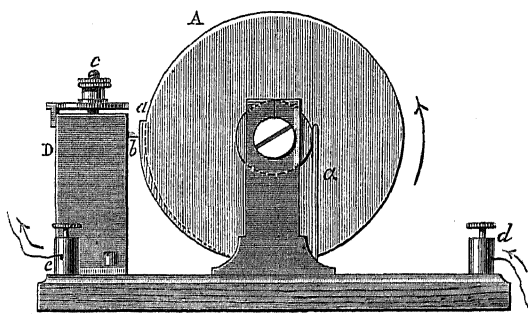
Disjoncteur. — Il présente d'abord trois roues en cuivre de 1 décimètre de diamètre A, B, B (*fig. 1*), montées sur le même arbre hori-



zontal, et soigneusement isolées de cet arbre par des pièces d'ébonite. La roue A produit la fermeture et la rupture du courant inducteur. A cet effet, elle présente un petit filet excentrique *a* (*fig. 2*), qui vient à chaque tour frotter contre une pièce en bronze *b* taillée en couteau.

Cette pièce, constamment poussée par un ressort, est tenue à distance de la roue A par une vis buttante et ne communique avec elle qu'au passage du filet α . La pièce b fait partie d'un système très-solide D,

Fig. 2.



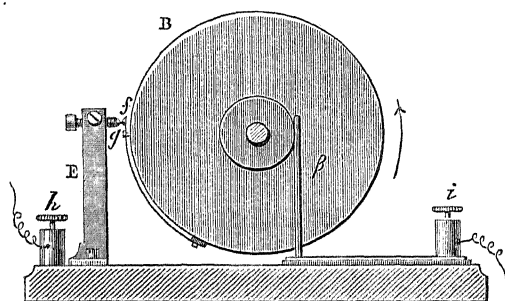
isolé du reste de l'appareil, et dans lequel elle peut s'élever ou s'abaisser verticalement de quantités soigneusement mesurées par une vis micrométrique c graduée à $\frac{1}{50}$ de millimètre. Le courant inducteur entrant par la borne d passe dans la roue A par le ressort frotteur α , et, pendant le contact de la pièce b avec le filet α , gagne le système D et retourne à la pile par la borne e . Le frottement a lieu sur un parcours angulaire d'environ 25 degrés (¹); ce qui, en admettant une vitesse de rotation de l'appareil de vingt tours par seconde, que je n'ai jamais atteinte, représente un temps de fermeture supérieur à $\frac{1}{300}$ de seconde. C'est, comme on le verra, plus de temps qu'il n'en faut pour qu'un courant arrive à l'état permanent, du moins dans les conditions où je me suis toujours placé.

Les roues B, B sont identiques. Chacune d'elles présente un couteau f (fig. 3) parallèle à l'axe de rotation, porté à l'extrémité d'un long ressort couché parallèlement à la circonférence de la roue et qu'empêchent de vibrer des vis buttantes le condamnant à n'effectuer que des mouvements d'amplitude extrêmement faibles. A chaque révolution, le couteau touche une pointe fixe g , portée sur une colonne isolée E et mise en relation avec les quadrants de l'électromètre par

(¹) La longueur de la partie frottée était d'environ 2°,5; la circonférence de la roue étant $10^\circ \times 3,14 = 31^\circ,4$, cette longueur représente un angle égal à $\frac{360 \times 2,5}{31,4} = 28^\circ$.

un fil partant de la borne h . Chaque roue B communique en outre constamment par un frotteur β isolé du reste de l'appareil, avec une borne i , mise par un fil en relation métallique avec une extrémité du fil induit.

Fig. 3.



Au moyen de la loupe, contrôlée par un procédé qui sera indiqué dans la seconde Partie, je m'assurais que les contacts des couteaux f avec les pointes g avaient bien lieu au même instant. Si l'on se reporte alors à la description du système D, on voit qu'en faisant monter ou descendre la pièce b au moyen de la vis micrométrique c (*fig. 2*), on peut faire que l'instant du double contact des couteaux f (*fig. 3*) et des pointes g se rapproche ou s'éloigne de quantités bien déterminées de celui de la rupture métallique du courant inducteur.

Ces quantités, mesurées par la vis micrométrique, se traduisent aisément en temps, comme on le verra plus loin, si l'on connaît la vitesse de rotation de l'appareil. Pour mesurer cette vitesse, une came K (*fig. 1*), pressant sur un ressort, fermait, comme on le verra, le courant spécial d'un appareil inscripteur qui comptait le nombre de tours faits par seconde.

Enfin la poulie G (*fig. 1*) était reliée à l'arbre du moteur par une corde qui communiquait le mouvement à l'appareil.

MM. Brünnner frères ont bien voulu se charger de la construction de cet appareil qui demandait la sûreté et la précision que l'on est habitué à rencontrer à un si haut degré chez tout ce qui sort de leurs mains. Je les en remercie bien sincèrement. Les frais en ont été supportés par le laboratoire de Physique de l'École Normale, où a été fait ce travail.

Pour cela et pour bien d'autres choses, j'exprime ici toute ma reconnaissance à M. Bertin.

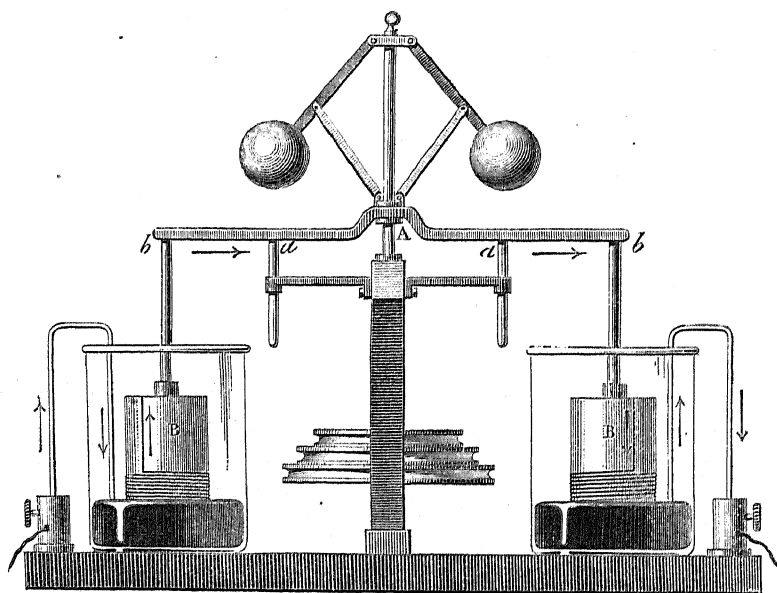
Moteur et régulateur. — Je me suis servi pour moteur d'une petite machine Gramme dans le fil de laquelle était lancé le courant de deux ou trois éléments Bunsen. Cette machine est pour les cabinets de Physique un moteur d'un emploi très-commode. Ses seuls défauts sont l'irrégularité de combustion de son foyer qui est la pile, et aussi, du moins pour les petites machines, la trop petite masse de l'anneau en mouvement, qui laisse se traduire les plus légères causes accidentelles de variation du mouvement.

J'ai purement remédié à ces inconvénients par l'emploi du régulateur suivant :

C'est le système à force centrifuge de Watt, prenant son mouvement par une corde sur l'arbre même de la machine.

Au sommet A (*fig. 4*) du losange articulé où se trouve fixé dans le

Fig. 4.



régulateur des machines à feu l'anneau portant le bras du levier qui doit augmenter ou diminuer l'entrée de la vapeur dans le cylindre, est fixée une tige horizontale faisant corps avec cet anneau, et guidée par

deux baguettes verticales a, a , l'empêchant de faire autre chose que s'élever ou s'abaisser parallèlement à elle-même, selon que les boules s'élèvent ou s'abaissent. Aux deux extrémités b, b de cette tige horizontale sont fixés deux cylindres B, B en caoutchouc durci sur chacun desquels est enroulé en hélice un fil de fer de $\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre environ. Ces cylindres plongent dans des vases remplis de mercure; le fil de fer enroulé se trouve ainsi communiquer par une extrémité avec le mercure, par l'autre avec l'ensemble métallique de l'appareil. Les cylindres étant creux, on peut, en versant du mercure dans l'intérieur, modifier à volonté l'effet moyen de la poussée.

Le courant qui fait mouvoir le moteur, au lieu de se rendre directement dans celui-ci, est d'abord lancé dans le mercure des vases; de là il passe dans les spires émergées du fil de fer, puis dans la machine. On comprend qu'un accroissement de vitesse, par exemple de celle-ci, se traduit immédiatement par la sortie d'une ou plusieurs spires du mercure; d'où une augmentation de résistance et, par suite, un affaiblissement du courant moteur dont les chiffres suivants vont donner l'idée.

La résistance totale du fil de la machine Gramme que j'ai employée est de 0,683 unité Siemens ⁽¹⁾; la longueur du fil de fer formant une spire était 16^c, 8 et la résistance de 1 mètre de ce fil 0^{us}, 841, d'où pour une spire 0^{us}, 141. La machine étant alimentée par deux éléments Bunsen, dont la résistance moyenne était 0^{us}, 1 ⁽²⁾, on voit que la résistance totale du circuit, en supposant deux spires émergées à chaque cylindre, était égale à

$$0,683 + 0,564 + 0,2 = 1^{\text{us}}, 447.$$

L'introduction dans ce circuit moyen d'une spire à chaque cylindre augmente sa résistance de 0^{us}, 282, c'est-à-dire environ des $\frac{2}{10}$ de sa valeur, fraction bien supérieure aux variations rapides que peut éprouver, soit la résistance, soit la force électromotrice d'une pile bien montée.

⁽¹⁾ On sait que cette unité est la résistance à zéro de 1 mètre de mercure de 1 millimètre carré de section. La maison Siemens et Halske, de Berlin, fabrique des étalons contrôlés en maillechort; c'est à l'aide d'un de ces étalons que j'ai effectué toutes mes mesures de résistance.

⁽²⁾ Les mesures de résistance de fil ont été faites par le procédé ordinaire du pont de Wheatstone; celles des piles par une méthode que j'ai indiquée au *Journal de Physique* de M. d'Almeida, t. V, p. 144 (1876).

Si la vitesse tendait à diminuer, les choses se passeraient évidemment d'une façon analogue en sens inverse.

Il suit de là que, la hauteur moyenne des boules étant atteinte, on peut être certain *a priori* que cette hauteur ne variera, du fait de la pile motrice, que de quantités bien inférieures à la distance de deux spires consécutives ⁽¹⁾.

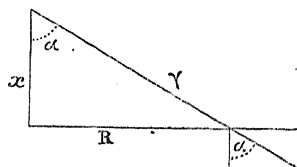
Les boules assez lourdes du régulateur, jouant le rôle d'un volant, augmentent en même temps l'inertie du moteur, et remédient au second inconvénient signalé plus haut.

Il est évident que cet appareil, qui régularise, non le courant de la

⁽¹⁾ Il est aisé de conclure de ce fait les limites extrêmes entre lesquelles restera certainement enfermée la vitesse.

Si ω est la vitesse moyenne de rotation du régulateur, que je suppose atteinte, l'instru-

Fig. 5.



ment satisfaisant, cela va sans dire, à la condition de possibilité bien connue $g < \omega^2 \gamma$ (fig. 5), on a

$$R = x \tan \alpha,$$

et comme $\tan \alpha = \frac{\omega^2 R}{g}$, $x = \frac{g}{\omega^2}$; par suite, à une petite variation Δx , correspond une variation $\Delta \omega$, donnée par

$$\Delta x = -\frac{2g}{\omega^3} \Delta \omega,$$

en négligeant les puissances de $\Delta \omega$ supérieures à la première. En remplaçant ω par le nombre n de tours par seconde, $\omega = 2n\pi$, on a

$$\Delta x = -\frac{2g}{8n^3\pi^3} 2\pi \Delta n.$$

La valeur moyenne de n était 5; la distance des spires, c'est-à-dire la valeur maximum de Δx , 1 millimètre; en mettant ces valeurs dans la formule qui précède et effectuant, on trouve pour le maximum de Δn le nombre 0,250, et par suite 0,05 ou $\frac{1}{20}$ pour le rapport de la variation maxima de la vitesse à la valeur moyenne de cette vitesse.

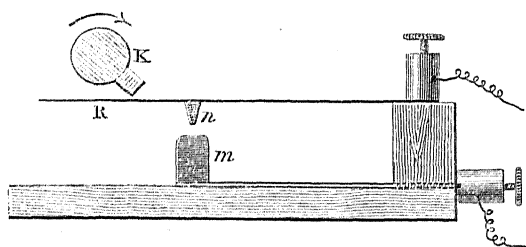
On verra tout à l'heure que ce nombre, basé sur une variation que n'éprouvent jamais des éléments de Bunsen, doit être encore de beaucoup diminué.

pile, mais le mouvement qui en résulte, peut être appliqué à toute espèce de moteur alimenté par un courant électrique.

Cet appareil a été construit chez M. Ducretet. C'est lui qui m'a conseillé de faire plonger les cylindres dans du mercure, au lieu de les faire frotter contre un ressort, comme j'en avais d'abord l'idée.

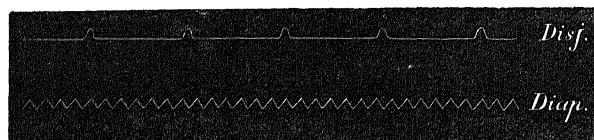
Inscripteur du mouvement. — Je devais d'abord savoir jusqu'où allait réellement la régularité du mouvement. Pour cela j'adaptai au disjoncteur le petit appareil représenté *fig. 6*. La came *K*, dont on a vu la

Fig. 6.



place dans la description du disjoncteur, venait à chaque tour de celui-ci presser le ressort *R* et amener le contact entre la pointe *n* et l'enclume *m*. Le courant d'une pile spéciale, alors fermé, mettait en action un électro-aimant inscripteur ordinaire. Ce dernier traçait une courbe indicatrice du mouvement sur un cylindre tournant recouvert de papier noirci, concurremment avec celle des vibrations d'un diapason de M. Koenig donnant l'*ut*, c'est-à-dire faisant 64 vibrations complètes par seconde. La *fig. 7* donne une idée de l'ensemble de ces

Fig. 7.



deux courbes, dont j'ai obtenu ainsi plus de 30 séries parfaitement nettes. Je me suis borné à compter le nombre des vibrations du diapason correspondant à 20 tours du disjoncteur, et, dans une série par exemple, j'ai trouvé ce nombre toujours compris entre 100 et 101. Je puis donc affirmer que le nombre *n* de tours par seconde restait com-

pris, ce jour-là, entre $\frac{20 \times 64}{100} = 12,8$ et $\frac{20 \times 64}{101} = 12,7$, c'est-à-dire qu'il ne variait pas dans un intervalle de plus de quatre minutes, durée de la série, de $\frac{1}{100}$ de sa valeur moyenne (').

Une fois assuré de la régularité du mouvement, je simplifiai de la façon suivante la mesure journalière de la valeur absolue de sa vitesse. Par la méthode précédente, je traçai simultanément deux courbes, l'une de la marche du disjoncteur, l'autre de celle de la machine Gramme; et je pus constater qu'à 14 tours du premier correspondaient exactement 5 tours de la seconde. Je pris alors le récepteur d'un télégraphe Morse dont le mouvement d'horlogerie, comparé à un excellent chronomètre de Winnerl, déroulait toujours, à 1 ou 2 millimètres près, 85 centimètres de papier par minute. L'appareil de la *fig. 6* étant alors placé sur la machine motrice, j'envoyai le courant qui lui correspondait dans le récepteur Morse. On voit qu'en supposant une vitesse du disjoncteur de 20 tours par seconde, ce qui correspondrait à $\frac{5 \times 20}{14}$, pour la machine, la pointe du télégraphe ferait sur le papier des points distants de $\frac{850^{\text{mm}} \times 14}{60 \times 100}$ ou 2 millimètres environ, distance à laquelle ils sont parfaitement distincts. Une petite formule que l'on verra plus loin me permettait, connaissant le nombre de ces points compris dans une bande de longueur donnée, d'obtenir immédiatement la valeur absolue en temps correspondant à un déplacement connu de la vis micrométrique du disjoncteur.

Électromètre et sa graduation. — Je n'ai rien à dire des électromètres à quadrants de M. Thomson, déjà devenus classiques. Les potentiels

(') Il suffit d'être assuré de la régularité du mouvement pendant un temps relativement court, mais suffisant pour une expérience. « Le succès de ces recherches, dit M. Guillemin, est basé sur l'uniformité du mouvement de rotation, dont on peut changer la vitesse dans les diverses expériences, pourvu qu'elle soit invariable dans chacune. » *Mémoire sur l'état variable du courant dans les fils télégraphiques* (*Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. LX, 1860, p. 407).

Lorsqu'on ôte le régulateur, le mouvement donné par la machine Gramme, surtout si les piles ne sont pas fraîchement montées, se compose de périodes assez régulières, d'une seconde environ d'accélération et de retard, que l'oreille perçoit très-nettement et que je ne saurais expliquer.

que j'avais à mesurer pouvant atteindre de très-grandes valeurs, j'ai fait choix d'un instrument à boîte spacieuse (1 décimètre de diamètre sur 3 centimètres de hauteur). Fabriqué chez MM. Elliott, de Londres, il présente le système de réflecteur communément employé dans les galvanomètres Thomson : un petit miroir concave, de 80 centimètres environ de rayon de courbure, fixé à l'aiguille. En regard et à 80 centimètres, se trouve une planchette portant une échelle et, au-dessous de cette échelle, une fente éclairée par une lampe. L'image de la fente se produit très-nette sur l'échelle ⁽¹⁾.

Dans celle que j'ai employée, chaque division était de $\frac{1}{40}$ de pouce anglais, c'est-à-dire de $\frac{1}{1600}$ de mètre. En tendant un fil fin au milieu de la fente lumineuse, on peut apprécier sans peine la demi-division, d'où une approximation de $\frac{180 \times 60}{\pi \times 3200 \times 0,80}$, soit un peu plus de 1 minute ⁽²⁾. Si cette approximation est moins satisfaisante que celle que l'on obtiendrait avec les lunettes, ce procédé présente en revanche l'avantage de n'exiger qu'un coup d'œil jeté sur l'échelle pendant même qu'on opère, avantage immense quand on étudie, comme c'est à peu près le cas au début de tout travail, un phénomène dont on ne connaît ni l'intensité, ni peut-être même le sens. A ce dernier point de vue surtout, je me permets de recommander ce système aux chercheurs.

J'ai entouré l'instrument d'une boîte métallique communiquant au sol, écran électrique, comme l'appelle M. Thomson, qui en attribue l'idée à Faraday ⁽³⁾, protégeant l'appareil contre les courants d'air et les influences électriques extérieures. Une petite ouverture, fermée par une glace de verre, laissait passer la lumière destinée à la lecture. L'aiguille, formée d'une lame très-mince d'aluminium, était suspendue par un bifilaire en cocon, et portait un fil de platine plongeant, comme

⁽¹⁾ D'après M. Thomson (*Reprint of papers on electrostatics and magnetism*, p. 267 et 268), les constructeurs anglais auraient porté à un haut degré de perfection la fabrication de ce genre de miroir; on aurait de bonnes images avec des miroirs ne pesant pas plus de $\frac{1}{22}$ et même $\frac{1}{40}$ de gramme. M. Lutz m'en a construit donnant des images excellentes et pesant moins de 1 décigramme, avec 1 centimètre de diamètre.

⁽²⁾ M. Thomson (*loc. cit.*, p. 268) dit qu'on peut apprécier le $\frac{1}{4}$ et même le $\frac{1}{10}$ d'une des divisions ci-dessus, ce qui porterait l'approximation à 20 secondes environ; mais il faut être alors dans une chambre complètement obscure.

⁽³⁾ THOMSON, *loc. cit.*, p. 203, 239, 256.

dans tous les électromètres Thomson, dans un condensateur à acide sulfurique. Sur l'avis de M. Mascart, dont les bienveillants conseils ne m'ont jamais fait défaut, et que je remercie vivement, j'ai terminé ce fil de platine par une palette légère amortissant les oscillations.

Je demande à insister quelque peu sur le mode de charge de l'aiguille, et surtout sur l'étude et la graduation de l'instrument.

L'aiguille était chargée par la communication de l'acide du condensateur avec un des pôles d'une pile ouverte de 50 éléments zinc-platine-eau, ou zinc-cuivre-eau, dont l'autre pôle était relié au sol ⁽¹⁾. Un commutateur à bascule, qu'il est aisé d'imaginer, me permettait d'intervertir rapidement l'ordre des communications, et de donner ainsi à l'aiguille une même valeur de potentiel, soit positif, soit négatif ⁽²⁾.

Ce procédé de charge, appliqué aux électromètres Thomson par M. Branly ⁽³⁾, est d'une grande commodité.

On lui a objecté la variabilité de la force électromotrice de la pile de charge; j'ajouterai que d'autres causes encore peuvent venir modifier la sensibilité et les données de l'instrument, entre autres l'état de l'acide dans lequel plonge le fil de platine attaché à l'aiguille, surtout quand ce fil porte une palette.

Je me suis mis en garde contre toutes ces objections de la façon suivante. Je considère comme toujours égale à elle-même, dans les limites ordinaires de température d'un appartement, la force électromotrice de 1 élément Daniell monté avec soin, depuis une heure environ, avec des dissolutions identiques de sulfate de zinc et de sulfate de cuivre ⁽⁴⁾.

⁽¹⁾ M. Thomson (*loc. cit.*, p. 267) recommande de charger l'aiguille positivement, le fluide positif, dit-il, s'échappant bien moins d'un conducteur à angles que le fluide négatif. Cette précaution peut être utile dans le cas des charges que donne M. Thomson, charges obtenues par un frottement de diélectrique, atteignant par cela rapidement une valeur considérable de potentiel, et dont l'entretien ne laisse pas que d'être toujours pénible; elle ne l'est plus dans les conditions de charge relativement faible et constante où l'on se trouve placé par l'emploi d'une pile ouverte, et l'on verra même qu'il peut être d'une grande utilité de changer, comme il est dit dans le texte, le signe de la charge de l'aiguille, tout en lui laissant la même valeur absolue.

⁽²⁾ Il est bon, dans ce cas, de donner à la pile de charge une assez grande capacité électrique. Je la constituais avec cinquante flacons de 4 centilitres, à col large et verni, dans lesquels plongeaient les soudures métalliques.

⁽³⁾ *Annales scientifiques de l'École Normale supérieure*, 2^e série, t. II, p. 210.

⁽⁴⁾ M. Thomson, qui, comme on le verra plus loin, se réfère à des Daniell dans une

J'avais une batterie de 20 éléments parfaitement entretenus et remontés à neuf tous les jours d'expériences; au commencement et à la fin de toute série, je les mettais en relation avec les quadrants de l'électromètre. J'obtenais ainsi, pour l'instant considéré, la valeur exacte en Daniell d'une ordonnée déterminée de la courbe de graduation de l'instrument.

Reste à établir cette courbe de graduation. J'ai pris pour cela une collection de 120 éléments de pile zinc-platine-eau, que je pouvais fractionner par groupe de 5 éléments. Deux groupes de 5 réunis produisant toujours une déviation à peu près égale à la somme de leurs déviations individuelles, je me suis contenté généralement de joindre les piles par groupes de 10. Chaque groupe était d'abord étudié séparément; je les assemblais ensuite à 2, 3, ..., et j'inscrivais les déviations correspondantes. Ce procédé est imité de la graduation du galvanomètre au moyen de la lentille à quatre secteurs de MM. de la Provostaye et Desains, et basé, comme on le voit, sur le principe d'addition des tensions de Volta.

Voici un des tableaux ainsi dressés :

4 avril 1876. — L'aiguille est chargée avec 50 éléments zinc-platine-eau, fraîchement préparés; elle est reliée au pôle positif de cette pile; l'autre pôle communique au sol par un fil soudé aux tuyaux de conduite du gaz de l'éclairage. Les éléments d'essai sont disposés par séries de 10 que je marque des lettres A, B, C,

Il a été fait, avec chaque groupement, trois expériences, distinguées par les chiffres 1, 2, 3 de la colonne II :

- | | | |
|---|--|---|
| 1 | le milieu de la série communiquant au sol; | |
| 2 | le pôle positif | , |
| 3 | le pôle négatif | , |

foule de mesures délicates, fait remarquer (*loc. cit.*, p. 246) que « la force électromotrice d'un Daniell varie de 2 ou 3 pour 100 avec les dissolutions employées; elle varie aussi un peu avec la température et certaines circonstances non encore élucidées ».

Je me suis affranchi des premières variations, de beaucoup les plus importantes, en préparant à l'avance des quantités suffisantes de dissolutions bien pures pour toute la durée des expériences. La dissolution de sulfate de cuivre marquait 20 degrés, celle de sulfate de zinc 10 degrés, à la température de 15 degrés, au pèse-sels de Baumé.

TABLEAU I.

Séries de piles.	Communication au sol.	Déviati droite.	Déviati gauche.	Somme.	Valeur réelle.	Moyenne de 2 et 3.	Différence avec 1.
I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
A	{ 1	43,5	43	86,5	86,5		
	{ 2	45	46	91			0,25
	{ 3	41	41,5	82,5		86,75	
B	{ 1	46	47	93	93		
	{ 2	49	49	98			0,75
	{ 3	43	43,5	86,5		92,25	
A + B	{ 1	82,5	82,5	165	179,5		
	{ 2	90	89	179			2,5
	{ 3	73	73	146		162,50	
C	{ 1	53	54	107	107		
	{ 2	57	56	113			1,5
	{ 3	48	50	98		105,5	
A + B + C	{ 1	126	128	254	286,5		
	{ 2	143	145	288			5
	{ 3	104	106	210		249	
D	{ 1	47	49	96	96		
	{ 2	50	52	102			1
	{ 3	43	45	88		95	
A + B + C + D	{ 1	160	160	320	382,5		
	{ 2	186	188	374			6,5
	{ 3	126	127	253		313,5	
E	1	38	40	78	78		
A + B + C + D + E	{ 1	182	183	365	460,5		
	{ 2	218	222	440			5,5
	{ 3	138	141	279		359,5	
F	1	38	38	76	76		
A + B + C + D + E + F	{ 1	198	202	400	536,5		
	{ 2	242	245	487			8
	{ 3	147	150	297		392	

Les piles d'essai étaient mises en relation avec les quadrants successivement dans les deux sens, d'où une déviation droite et une déviation gauche, inscrites en unités de l'échelle dans les colonnes III et IV; leur

somme, colonne V, est ainsi affranchie de l'erreur, toujours assez faible, du zéro de l'instrument.

Quant à la colonne VI, intitulée *valeur réelle*, il est aisé de voir que, pour toute série de 10, le nombre qu'elle présente est précisément celui qui correspond à la ligne 1 de la colonne V; les autres sont toujours la somme des deux qui les précèdent.

Il m'était trop facile de vérifier quelques conséquences de la formule que donne M. Mascart ⁽¹⁾ des électromètres Thomson, pour que je ne cherchasse pas à le faire. C'est la raison d'être des colonnes VII et VIII du tableau précédent.

D'après le professeur français, V étant le potentiel fixe de l'aiguille, V_1 , V_2 ceux des secteurs, le moment du couple qui tend à faire dévier l'aiguille supposée retenue a une expression de la forme

$$M = lV(V_1 - V_2) + h(V_2^2 - V_1^2),$$

où l et h sont deux constantes dépendant de l'instrument.

Or supposons que les points reliés aux secteurs soient, comme dans la graduation précédente, les pôles d'une pile ouverte de force électromotrice totale A ; appelons M_2 le moment du couple de déviation quand le pôle positif (l'aiguille étant chargée positivement) communique au sol; M_3 ce moment quand c'est le pôle négatif, et enfin M_1 quand on met au sol le milieu de la pile. On a, en appliquant la formule de M. Mascart,

$$M_2 = lVA + hA^2, \quad M_3 = lVA - hA^2,$$

$$M_1 = lVA, \quad \text{d'où} \quad M_1 = \frac{M_2 + M_3}{2},$$

c'est-à-dire que le moment dans ce dernier cas est la moyenne arithmétique des deux autres.

La colonne VIII renferme les différences entre les déviations correspondant à la disposition I et les moyennes arithmétiques de celles qui correspondent aux cas 2 et 3. On voit que l'égalité est absolue au début : des divergences ne commencent à se produire que quand les potentiels atteignent de grandes valeurs; mais alors la rigueur de la

⁽¹⁾ *Journal de Physique* de M. d'Almeida, t. IV, p. 324. — *Traité d'électricité statique*, t. I, p. 397.

formule aussi disparaît, car elle est établie en supposant qu'un couple antagoniste de moment égal à M maintient toujours l'aiguille dans sa position initiale symétrique par rapport aux quadrants.

L'examen des groupes de trois nombres de la colonne V montre combien différent, dès que la différence de potentiel mesurée devient un peu grande par rapport à la charge de l'aiguille, les déviations observées selon que le milieu ou l'une ou l'autre des extrémités de la pile communique au sol.

On peut à peu près annuler ces divergences en prenant très-élevé le potentiel de l'aiguille; l'équation d'équilibre pouvant s'écrire, comme le remarque M. Mascart (¹),

$$M = lV(V_1 - V_2) \left(1 + \frac{h}{l} \frac{V_1 + V_2}{V} \right),$$

le terme $\frac{h}{l} \frac{V_1 + V_2}{V}$ est alors négligeable devant l'unité.

C'est ainsi qu'opère M. Thomson. Je me proposais d'opérer aussi de cette façon; mais, tandis que je songeais aux moyens à employer pour réduire la sensibilité de l'électromètre, de manière à n'avoir que des déviations mesurables malgré les énormes valeurs de potentiel qui se seraient alors trouvées en présence, l'idée me vint que l'on peut éliminer cette difficulté et profiter même de ce qui semble un inconvénient, de ces charges relativement faibles, pour être renseigné sur les valeurs absolues des potentiels dont on veut apprécier la différence. Il suffit, pour cela, de renverser la charge de l'aiguille; si les potentiels des deux points étudiés sont égaux et de signe contraire, on aura une même déviation en sens inverse, ce qui n'aura lieu que dans ce cas. Si l'un des points a un potentiel zéro, par exemple, et l'autre un potentiel positif, la déviation sera plus forte, l'aiguille étant chargée négativement, que quand elle le sera positivement; et l'on obtiendra alors les nombres des lignes 2 et 3 dans la colonne V du tableau précédent, que l'on pourrait du reste étendre selon les besoins.

Il y a plus : la moyenne des deux déviations observées sera précisément proportionnelle à la différence de potentiel cherchée, et cela quelle que soit la valeur absolue de chacun des termes de cette différence.

(¹) *Journal de Physique*, loc. cit., p. 327.

Reprenons, en effet, la formule de M. Mascart: on a, V étant positif, par exemple,

$$M_1 = lV(V_1 - V_2) + h(V_2^2 - V_1^2);$$

V devenant $-V$, on a

$$M_2 = -lV(V_1 - V_2) + h(V_2^2 - V_1^2).$$

Dans ces formules, M a un signe selon son sens; le plus souvent M_2 sera de sens contraire à M_1 ; retrancher ces deux égalités membre à membre, c'est alors ajouter les valeurs absolues de M_1 et M_2 , et il vient, en prenant ces valeurs absolues,

$$\frac{M_1 + M_2}{2} = lV(V_1 - V_2).$$

Si M_2 était de même signe que M_1 , ce qui aurait lieu si le deuxième terme $h(V_2^2 - V_1^2)$ ou $h(V_1 - V_2)(V_1 + V_2)$ était très-grand, c'est-à-dire $V_1 + V_2$ pour une différence donnée, il faudrait faire la demi-différence des deux déviations.

J'ai vérifié ces conséquences avec la batterie de graduation employée plus haut.

Je citerai seulement les chiffres d'une seule expérience: elle est extraite d'un tableau dressé le 9 mai 1876; la pile de charge était formée de 50 éléments zinc-platine-eau montés à neuf; tous les contacts avaient été soigneusement appropriés et l'acide sulfurique de l'électromètre renouvelé. Je ferai remarquer, en passant, que l'épaississement qu'éprouve cet acide, par suite de son exposition permanente à l'air, malgré la boîte qui entoure l'électromètre, est une cause de différences de sensibilité sur laquelle il est urgent de veiller.

Les chiffres ci-dessous se rapportent à la communication avec les quadrants de 50 éléments zinc-platine-eau.

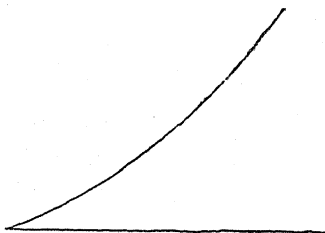
Ce tableau présente la vérification aussi satisfaisante que possible des conséquences énoncées plus haut; les nombres de la dernière colonne ne diffèrent pas les uns des autres de plus de $\frac{1}{90}$ de leur valeur.

TABLEAU II.

Charge de l'aiguille.	Dévi- ation droite.	Dévi- ation gauche.	Somme.	Moyenne.
<i>Milieu de la pile au sol.</i>				
—	180	195	375	366,5
+	170	188	358	
<i>Pôle négatif au sol.</i>				
—	220	220	440	363,5
+	150	137	287	
<i>Pôle positif au sol.</i>				
+	215	225	440	365
—	150	160	290	
<i>Dixième élément du côté négatif au sol.</i>				
+	170	175	345	362,5
—	185	195	380	

Si maintenant, sur une droite horizontale, on porte des longueurs proportionnelles aux nombres 1 de la colonne V du tableau de la page 18, ou, ce qui revient au même, aux nombres de la colonne VII, et qu'en chaque point ainsi déterminé on élève une perpendiculaire sur laquelle on portera des longueurs proportionnelles aux nombres de la colonne VI, on aura la courbe de graduation de l'instrument. J'en ai dressé plusieurs avec des charges diverses et à différents intervalles; elles ont toujours coïncidé avec des erreurs ne dépassant pas le $\frac{1}{50}$ de la valeur moyenne

Fig. 8.



de l'ordonnée correspondante. La *fig. 8* est une reproduction au $\frac{1}{20}$ de la courbe qui a servi aux mesures.

Cela posé, voici comment j'opérais chaque jour : le 2 mai 1876, à 2 heures par exemple, les 20 Daniell donnaient une déviation totale de 160; l'ordonnée correspondant à ce chiffre dans la courbe est 162; j'avais donc, ce jour-là, pour exprimer en Daniell la différence de potentiel correspondant à une déviation A, à multiplier la longueur B de l'ordonnée correspondante par le rapport $\frac{20}{162}$.

Cette idée de rapporter les indications de l'électromètre à celles qu'il donne quand on le met en relation avec des piles ouvertes revient à Dellmann, et M. Thomson s'en sert constamment, soit pour étudier la sensibilité de ses appareils, soit pour estimer des forces électromotrices atmosphériques (¹). Il emploie le plus souvent des éléments cuivre-zinc-eau, et se réfère à des Daniell pour s'affranchir des variations des premiers, ou pour faire des comparaisons délicates, comme, par exemple, la graduation de l'électromètre à quadrants par rapport à son électromètre absolu (²).

Appareils d'induction. — J'ai exécuté des mesures précises avec deux appareils d'induction. Le premier était la bobine induite d'un *Schlitten-Apparat* de du Bois-Reymond; elle vient d'un constructeur de Heidelberg, qui la catalogue comme formée de 13860 tours de fil. Ce fil a un diamètre de $\frac{1}{4}$ de millimètre et est en cuivre; sa résistance totale, mesurée au pont de Wheatstone, est 942 ohms (³) comme dimension extérieure, 15 centimètres de long sur 7^c,5 de diamètre extérieur, ce qui permet de fixer au fil une longueur approximative de 2500 mètres, d'ailleurs en rapport avec celle que l'on déduit de la résistance moyenne du cuivre. J'en ai retiré l'appareil inducteur, trembleur, fer, etc., pour ne conserver absolument que la bobine induite.

La seconde bobine m'a été gracieusement offerte par M. Ruhmkorff, et je l'en remercie. Elle se compose de deux bobines que l'on peut joindre de façon à reproduire une partie du système cloisonné des gros appareils. Le fil de chacune d'elles présente des sorties qui pourront

(¹) THOMSON, *loc. cit.*, p. 201, 202, 204, 205, 206, 300, 306.

(²) THOMSON, *loc. cit.*, p. 205, 242, 243.

(³) On sait que l'ohm est l'unité de résistance faisant partie de la série déterminée d'après les principes de Weber par l'Association britannique. Sa valeur, d'après Latimer Clark (*An elementary Treatise on electrical measurement*, London, 1868), est 1^{ms}, 0456.

permettre, je l'espère, d'étudier la distribution intérieure des tensions pendant le phénomène de l'induction. Le nombre total des spires, quand les deux bobines sont réunies en une seule, est de 7260; le fil a $\frac{2}{5}$ de millimètre de diamètre; sa résistance est de 164 ohms; sa longueur approximative 1200 mètres; les dimensions extérieures de ce second appareil sont du reste les mêmes que celles du précédent.

Dans l'une ou l'autre de ces deux bobines d'induction, je pouvais introduire une bobine inductrice, dont le diamètre extérieur était égal au diamètre intérieur des premières, et qui avaient même longueur qu'elles. J'ai construit quatre de ces bobines inductrices, présentant une, deux, trois et quatre épaisseurs de spires d'un fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre soigneusement recouvert de soie. Le nombre des spires pour chaque couche était de quatorze. Les résistances de ces bobines étaient respectivement, en unités Siemens, 0,216-0,396-0,587-0,738.

Elles ne présentaient aucune pièce de fer à l'intérieur, mais cet intérieur était creusé de façon à en recevoir à volonté; ce qui sera toujours spécialement indiqué dans les quelques cas où j'ai voulu constater l'action du fer sur les phénomènes.

Courant inducteur. — Le courant inducteur a toujours été fourni par un élément Daniell monté avec les solutions de sulfate de zinc et de sulfate de cuivre, dont j'ai donné les titres plus haut. L'intensité des phénomènes m'a obligé à réduire de plus en plus les dimensions de cet élément; c'était à la fin le modèle dit *moyen modèle* des fabricants, et j'ai dû souvent ne le remplir qu'au tiers et même au quart de sa hauteur. Du reste, j'ai eu soin chaque fois d'en mesurer la résistance, que l'on trouvera citée dans les différents tableaux d'expériences qui seront rapportées plus loin. Je citerai aussi chaque fois la résistance extérieure du circuit, ce qui définira complètement le courant. *Un shunt* ⁽¹⁾ lançait, dans un galvanomètre de Weber, une fraction de ce

(¹) Les télégraphistes paraissent avoir adopté ce nom, par lequel les Anglais désignent les appareils réalisant immédiatement une dérivation connue dans un galvanomètre de résistance déterminée. J'ai décrit (*Journal* de M. d'Almeida, t. V, p. 147) celui que j'ai employé, que l'on peut construire soi-même et avec lequel on donne à la dérivation telle valeur que l'on veut.

courant que je n'ai pas cherché à apprécier, mais que j'ai amenée à ne pas faire dépasser, au trait lumineux indicateur, les limites d'une échelle analogue à celle qui servait à l'électromètre, ce qui représente une déviation maximum de 5 ou 6 degrés. Un rhéocorde de Pogendorff me permettait de ramener le courant toujours à la même intensité, soit que celle-ci se fût un peu modifiée d'elle-même, soit que j'aie introduit dans l'appareil d'induction une bobine de résistance différente. Enfin, comme, dans ces limites de déviation, toutes les proportionnalités physiques et trigonométriques peuvent être admises, je réalisais des intensités de courant inducteur moitié, tiers, etc., en touchant au rhéocorde jusqu'à ce que le trait lumineux marquât sur l'échelle des nombres moitié, tiers, etc., du nombre primitif.

La mesure galvanométrique étant faite, l'instrument était soustrait à l'action du courant, et je substituais au *shunt* une résistance rectiligne égale, de façon à bien conserver le courant mesuré.

SECONDE PARTIE.

DISCUSSION DE LA MÉTHODE. — RÉSULTATS.

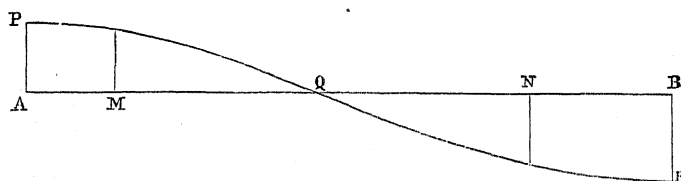
Discussion théorique. — La méthode repose sur les principes suivants, dont l'évidence paraît incontestable :

1° Si, pendant que le courant inducteur est fermé, on met deux points quelconques du fil induit en rapport avec les quadrants de l'électromètre, l'aiguille n'est pas déviée, c'est-à-dire que ces deux points ne présentent aucune différence de potentiel. On devait s'y attendre, puisqu'on sait que le fil fermé ne serait, pendant ce temps, le siège d'aucun mouvement électrique. La différence de potentiel commence à se produire dès la rupture métallique du courant inducteur, et on la retrouve nulle quelques instants après cette rupture. Tous les rhéotropes multipliant les effets sont basés sur ce qu'on admet que les phases, quelles qu'elles soient, par lesquelles a passé cette différence entre ces

deux valeurs zéro, se reproduisent identiquement après chaque rupture, rien n'étant changé dans aucune partie de l'appareil.

2° Considérons le fil induit AB pendant le phénomène; il présente à un temps θ une certaine distribution de potentiel, figurée, par exemple, par la courbe PQR (*fig. 9*), distribution variant avec le temps, mais

Fig. 9.



reprenant périodiquement la forme PQR aux temps $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$, distants de la durée de la rotation du disjoncteur. A ces différents instants, deux conducteurs isolés α et β , non soumis à la cause inductrice, sont mis en relation métallique avec deux points M et N du fil, et cela pendant un temps assez court pour que la déformation de la courbe correspondant à ce temps puisse être considérée comme très-légère; après un nombre de contacts qui dépendra de la capacité relative du fil AB et des conducteurs α et β , ces derniers auront pris et conserveront la différence de potentiel des points M et N correspondant à l'instant étudié; et, à partir de ce moment, ces contacts ne troubleront plus la distribution électrique sur AB, que dans la mesure des pertes que pourront éprouver les conducteurs α et β entre deux contacts successifs; ces pertes peuvent être considérées comme nulles avec des contacts se succédant à moins de $\frac{1}{10}$ de seconde d'intervalle, et quand il s'agit de potentiels ne dépassant pas une centaine de Daniell.

Si l'on se reporte aux analogies établies et si souvent invoquées par M. Thomson, entre la propagation de la chaleur et celle de l'électricité, le potentiel électrique et la température, ou plus simplement à la considération de la charge à refus des anciens électriciens, ce qui précède paraîtra incontestable.

Discussion pratique. — J'ai montré plus haut comment a été établie la graduation de l'électromètre, comment on peut tirer des déviations de l'instrument, par le renversement de la charge de l'aiguille, la diffé-

rence des potentiels des deux points mis en relation avec les secteurs, et une indication sur les valeurs absolues de ces potentiels. On a vu également comment je me suis assuré de la régularité du mouvement du disjoncteur et la façon dont je déterminais, pour chaque série d'expériences, la valeur absolue de sa vitesse. Il ne me reste plus que quelques mots à dire sur le mode de fonctionnement de ce disjoncteur, et sur la précision dont il était susceptible.

Les deux contacts qui mettaient en relation les points à étudier du fil induit avec les quadrants de l'électromètre étaient retouchés dès qu'ils avaient atteint par l'usure plus de $\frac{1}{10}$ de millimètre de largeur.

La simultanéité de ces deux contacts s'établissait et se vérifiait de la façon suivante : une pile ouverte était mise directement en relation avec les quadrants de l'électromètre, et l'on notait la déviation ; on l'y mettait ensuite par l'intermédiaire des roues B, B et des contacts f , g ; les couteaux f , qui pouvaient se mouvoir légèrement sur la circonférence des roues B, étaient déplacés jusqu'à ce que la déviation fût la même ⁽¹⁾. (Voir *fig.* 2 et 3.)

Le couteau qui fermait et ouvrait le courant inducteur n'a jamais dépassé non plus $\frac{1}{10}$ de millimètre, au moins tant que j'ai voulu surtout déterminer les variations des phénomènes avec le temps.

Comme on le verra plus bas, la vitesse ordinaire du disjoncteur a été de 12 à 15 tours par seconde. Le diamètre des roues était exactement de 1 décimètre, d'où leur circonférence de 314 millimètres. Si l'on suppose un contact d'une étendue de $\frac{1}{10}$ de millimètre, sa durée sera par conséquent de $\frac{1^s}{314 \times 15 \times 10} = \frac{1}{47100}$ de seconde, dans le cas de ma plus grande vitesse, et de $\frac{1}{314 \times 12 \times 10} = \frac{1}{37680}$ pour l'autre ; je puis donc affirmer que la durée des contacts s'est toujours maintenue égale à $\frac{1}{40000}$ de seconde environ.

La vis micrométrique c (*fig.* 2) avait un pas de $\frac{1}{2}$ millimètre, et portait un limbe divisé en 25 parties égales ; à chacune de ces parties correspondait donc un déplacement vertical du couteau de $\frac{1}{50}$ de milli-

(1) M. Brünner préférerait faire ce réglage à la loupe, de sorte que le procédé indiqué dans le texte était plutôt une vérification, toutes les fois que l'instrument revenait de chez lui.

mètre ⁽¹⁾. Faire marcher cette vis d'une division du limbe revenait donc à rapprocher ou à éloigner de $\frac{1}{40000 \times 5} = \frac{1}{200000}$ de seconde en moyenne l'instant du double contact de celui de la rupture métallique du courant inducteur.

Ainsi que je l'ai dit déjà, la valeur absolue de la vitesse du disjoncteur était fournie par un récepteur Morse, dont le mouvement d'horlogerie déroulait 850 millimètres de papier par minute; les points marqués sur ce papier correspondaient aux tours de l'arbre de la machine motrice, et le disjoncteur faisait 14 tours pendant que cet arbre en faisait 5. Soit n le nombre de points compris dans une bande de papier de l millimètres; ces l millimètres représentent un temps égal à $\frac{60^s \times l}{850}$; dans ce temps, l'arbre du moteur a fait n tours : donc le disjoncteur, $\frac{14n}{5}$; par suite, celui-ci en faisait dans une seconde

$$\frac{14n}{5} \times \frac{850}{60 \times l} = \frac{119}{3} \frac{n}{l}.$$

Il m'était plus utile de connaître la durée correspondant à une division du limbe de la vis micrométrique. Si m est le nombre de tours par seconde du disjoncteur, la durée du passage de $\frac{1}{50}$ de millimètre de sa circonférence est égale à

$$\frac{1^s}{314 \times m \times 50} = \frac{1}{15700 \times m};$$

et, comme $m = \frac{119}{3} \frac{n}{l}$, il suit que la durée θ dont il s'agit est donnée par la formule

$$\theta = \frac{1}{15700} \frac{3}{119} \frac{l}{n}.$$

Ainsi, le 26 avril 1876, un relevé de vitesse fait à 2 heures fournit une bande portant 27 points sur une longueur de 80 millimètres; il en résulte que le nombre de tours par seconde du disjoncteur était, à ce moment,

$$\frac{119}{3} \frac{27}{80} = 13 \frac{3}{8},$$

(¹) Le nom de MM. Brünnér est une garantie suffisante de la rigueur de ces chiffres.

et le temps θ correspondant à une division du limbe de la vis micrométrique

$$\frac{1}{15700} \frac{3}{119} \frac{80}{27} = 0^s,0000048.$$

Il reste un dernier point à établir. Pour éviter de trop longs frottements, le courant inducteur ne restait fermé que pendant un temps très-court, quoique toujours supérieur à $\frac{1}{300}$ de seconde, comme je l'ai montré plus haut. On peut se demander si ce temps était suffisant. Pouillet tire de son expérience de la roue dentée ⁽¹⁾ la conclusion suivante : « Dans $\frac{1}{2400}$ de seconde, un courant se propage avec toute son intensité dans le circuit qui lui est offert; d'autres expériences analogues m'ont démontré que cette propagation intégrale se fait encore dans $\frac{1}{5000}$ et même dans $\frac{1}{7000}$ de seconde ⁽²⁾. »

Bien que l'expérience classique de Pouillet ait été faite dans le but d'introduire la notion de quantité d'électricité dans l'étude du phénomène galvanique, plutôt que dans celui d'étudier la période d'établissement du courant, il est aisé d'établir, en appliquant la théorie mécanique des forces de percussion à l'état d'équilibre expérimental de l'aiguille, le théorème suivant : *Quand, dans une disposition donnée de la roue dentée, se vérifie la proportionnalité constituant le théorème de Pouillet, l'effet de l'état variable sera négligeable devant celui de l'état permanent. Cela n'aura pas lieu quand cette proportionnalité ne se vérifie pas.* Et c'est ainsi, comme le fait remarquer M. Pouillet lui-même ⁽³⁾, que, « en vertu de la réaction qui constitue les phénomènes d'induction, on observe alors des résultats tout à fait différents; c'est même un très-utile moyen d'étudier ces phénomènes singuliers de réaction et d'examiner les renversements de courants qu'ils produisent quelquefois ».

C'est là le point de départ du travail de M. Bertin que j'ai déjà eu occasion de rappeler plus haut ⁽⁴⁾.

La même théorie des forces de percussion, appliquée aux expériences

⁽¹⁾ POUILLET, *Traité de Physique et de Météorologie*, 7^e édition, t. I, p. 647.

⁽²⁾ POUILLET, *loc. cit.*, p. 817.

⁽³⁾ POUILLET, *loc. cit.*, p. 647.

⁽⁴⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 4^e série, t. XV.

de MM. Fizeau et Gounelle ⁽¹⁾, fournirait aussi plus aisément peut-être des nombres relatifs à l'état variable que des valeurs d'une vitesse de l'électricité ⁽²⁾.

On pourrait aussi chercher des chiffres dans les différents travaux entrepris sur l'état variable du courant ⁽³⁾; mais les deux remarques suivantes rendent toutes ces citations inutiles : 1° la durée de l'état variable ne dépend pas tant de la résistance du circuit que de sa disposition; 2° je cite ici les propres paroles de M. Gauguin : « On peut demander, et c'est une question que l'on a souvent posée, quel est le temps nécessaire pour obtenir l'état permanent, ou, en d'autres termes, quelle est la durée de l'état variable... On ne peut pas demander quel est le temps nécessaire pour atteindre d'une manière rigoureuse l'état permanent; ce temps serait toujours infini. Ce que l'on demande donc, c'est le temps nécessaire pour obtenir des tensions qui ne s'écartent pas sensiblement des tensions limites; mais il est clair que le problème posé dans ces termes vagues ne peut pas être résolu. Il faut dire avant tout ce que l'on entend par le mot *sensiblement*...; la détermination de la durée de l'état variable n'est donc un problème défini qu'autant que l'on indique le degré d'approximation que l'on veut obtenir ⁽⁴⁾. »

Je dois encore ajouter qu'il était nécessaire, dans mes expériences, que non-seulement le courant inducteur fût arrivé à l'état permanent, mais encore que tous les phénomènes d'induction de fermeture fussent éteints dans la bobine induite, au cas probable où ceux-ci dureraient le plus longtemps.

Toute difficulté s'est trouvée écartée par le fait suivant, que je n'ai pas manqué de constater à toutes mes séries d'expériences. Les contacts des extrémités de la bobine induite avec les quadrants de l'électromètre se faisant quand le courant inducteur était encore fermé pen-

⁽¹⁾ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XXX, p. 437; t. XXXIX, p. 469.

⁽²⁾ Voir la Notice placée par M. Gauguin à la fin de sa traduction du livre d'Ohm : *Théorie mathématique des courants*, p. 177. Note B.

⁽³⁾ Voir, par exemple, le Mémoire de M. Helmholtz : *Influence de l'extra-courant sur l'établissement et la cessation du courant*. (*Pogg. Ann.*, t. LXXXIII, p. 505; 1851.) — CAZIN, *Annales de Chimie et de Physique*, 4^e série, t. XVII, p. 418 (1869), etc. — GUILLEMIN, *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. LX (1860).

⁽⁴⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. LX, p. 327.

dant une longueur de plus de 1 millimètre, l'aiguille restait invariablement au zéro. Ainsi, lors de la rupture du courant inducteur, tous les phénomènes d'induction provenant de son établissement avaient complètement cessé d'être sensibles à l'électromètre depuis plus de 0^s,0002, et probablement depuis beaucoup plus longtemps.

Résultats obtenus.

Si l'on considère les deux extrémités bien isolées du fil d'une bobine induite, elles sont au même potentiel tant que passe le courant inducteur; elles y sont revenues un temps très-court après que ce courant inducteur a été rompu. Comment a varié, pendant ce temps, cette différence de potentiel partie de zéro et revenue à zéro? Telle est la question que j'ai essayé de résoudre. Autrement dit, si l'on prend les temps pour abscisses, les différences de potentiel pour ordonnées, quelle sera la courbe ainsi déterminée?

Je vais donner les résultats d'un travail de deux années dans l'ordre qui me paraît le plus propre à en faire ressortir quelques conséquences générales.

Commencement de la courbe. — Le commencement de la courbe m'a paru mériter une étude spéciale. Dans le travail que j'ai déjà signalé plus haut (¹), M. Blaserna signala et mesura un retard sensible entre la rupture du courant inducteur et la manifestation galvanométrique du courant induit. Il est vrai de dire que, dans les expériences de M. Blaserna, la bobine inductrice était éloignée de la bobine induite, et qu'elle pouvait même en être séparée par des substances de natures diverses, dispositions que je n'ai pas essayé de réaliser. Profitant du moment où mon disjoncteur remis à neuf présentait des arêtes de contact absolument vives, j'obligeai, par une disposition qu'il est facile de concevoir si l'on veut se reporter à la description du disjoncteur, un courant électrique à se fermer en passant d'une des trois roues à l'autre par le moyen des contacts; le 27 avril 1876, par

(¹) Voir aussi le Compte rendu des travaux de Physique faits à l'étranger, par M. Bertin (*Annales de Chimie et de Physique*, 4^e série, t. XXII, p. 500).

exemple, la vis micrométrique étant à 1 pour les tours et 8 au limbe, le galvanomètre indiquait le passage du courant; le limbe amené au chiffre 9, c'est-à-dire la vis marchant de $\frac{1}{50}$ de millimètre, le courant ne passait plus. Ainsi, la vis micrométrique étant au chiffre 1-9, le double contact avec les quadrants avait lieu un temps après la rupture du courant inducteur, certainement inférieur au temps θ déterminé plus haut, correspondant à $\frac{1}{50}$ de millimètre.

Voici le tableau extrait de mon livre d'expériences, que je copie tel qu'il est, c'est-à-dire sans apporter aucune correction aux données de l'électromètre.

27 avril 1876. — La pile inductrice est le Daniell demi-grandeur, rempli aux deux tiers. Les vingt Daniell d'essai donnent 80 de chaque côté à l'électromètre. La bobine induite est celle à 13 860 tours; la bobine inductrice a une seule épaisseur.

Vis micrométrique.	Déviation de l'aiguille.
1-6	0.
7	0.
8	0.
9	15 à droite.
10	Entre 30 et 40 à droite.
11	» 50 et 60 »
12	90 à droite, assez fixe.

La vis marchant en sens inverse.

1-12	90 à droite.
11	65 »
10	38 » bien fixe.
9	16 »
8	0 très-net.

Le relevé de vitesse donne 16 points en 60 millimètres; d'où, en appliquant la formule établie plus haut, on a, pour la durée θ correspondant à une division du limbe de la vis micrométrique,

$$\theta = \frac{1}{15700} \frac{3}{119} \frac{60}{16} = 0^s,000006.$$

Ainsi, un temps après la rupture du courant inducteur, certainement inférieur à $0^s,000006$, la différence de potentiel des extrémités de la bobine induite a déjà pris une valeur de 3 ou 4 Daniell.

Sur le bienveillant conseil de M. Terquem, j'ai longuement étudié ce début de la courbe : je n'ai pu y découvrir rien de remarquable ; elle n'est tangente ni à l'axe des temps, ni à celui des tensions ; elle s'élève très-rapidement, comme on le voit, par la difficulté de tenir l'aiguille de l'électromètre absolument immobile dans ces premiers points.

Les trois zéros qui sont en tête du précédent tableau montrent bien l'extinction de tout phénomène dû à l'induction de fermeture.

Durée de l'oscillation. — Ainsi que l'ont établi MM. Blaserna, Helmholtz, Bernstein ⁽¹⁾ et que je l'ai retrouvé moi-même ⁽²⁾, la courbe dont je viens d'esquisser les premiers points ne reste pas constamment du même côté de l'axe des temps. Partie de zéro, la différence de potentiel des deux extrémités du fil induit ne revient à zéro qu'après des oscillations autour de cette valeur, dont j'ai pu compter jusqu'à trente et au delà. J'ai fait, à plusieurs reprises, une étude spéciale de la durée de ces oscillations, parce qu'il était nécessaire, pour la rigueur des mesures de temps, que les contacts, remis soigneusement à neuf, ne présentassent pas des dimensions supérieures aux quantités dont avançait la vis micrométrique.

Dans les séries d'expériences que je vais rapporter, je me contentais donc d'observer le sens de la déviation de l'aiguille, notant quelquefois la valeur de l'impulsion, et portant surtout mon attention sur les points où se produisaient le zéro et le changement de signe. C'est ainsi seulement, du reste, qu'ont opéré MM. Bernstein et Helmholtz, et ce m'a été un motif de plus pour séparer ce paragraphe, afin de montrer ce que, outre la méthode, je crois avoir ajouté à des travaux que j'ignorais, mais que j'aurais pu connaître :

1° *Loi générale du phénomène.* — Elle va ressortir du tableau suivant.

⁽¹⁾ Voir l'*Historique*, ci-dessus, p. 204 et 205.

⁽²⁾ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 3 janvier 1876, p. 84.

TABLEAU I.

Bobine induite à 13 860 tours; bobine inductrice à deux épaisseurs; pile inductrice, Daniell demi-grandeur, rempli aux deux tiers, résistance 4^{us},5; résistance au dehors du circuit 1^{us},5.

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.	
1- 7	Léger mouvement.	
8	Légère impulsion.....	à droite.
16	Forte »	»
20	» »	»
2- 0	Faible »	»
3	» »	»
5	0.....	0.
7	70.....	à gauche.
12	Forte impulsion.....	»
17	» »	»
19	Faible » (100).....	»
21	0.....	0.
23	Légère impulsion.....	à droite.
3- 4	Forte »	»
10	» »	»
12	Faible »	»
13	0.....	0.
14	Légère impulsion.....	à gauche.
22	Forte »	»
4- 3	Faible »	»
5	0.....	0.
7	Faible impulsion.....	à droite.
16	Forte »	»
22	Faible » (30).....	»
23	0.....	0.
24	Impulsion de 40.....	à gauche.
5- 7	Forte impulsion.....	»
11	» »	»
15	0.....	0.
16	Impulsion de 40.....	à droite.

Le relevé de vitesse fournit 21 points dans 58 millimètres, ce qui donne, pour le temps θ correspondant à une des 25 divisions du limbe de la vis micrométrique,

$$\theta = \frac{1}{15700} \frac{3}{119} \frac{58}{21} = 0^s,0000045.$$

(On devine sans peine que les deux nombres qui se trouvent en regard dans la colonne de la vis micrométrique indiquent, celui de gauche le numéro du tour, celui de droite la division du limbe.)

Si l'on examine le tableau qui précède, on voit que la position des zéros est déterminée à moins d'une unité près des divisions du limbe de la vis micrométrique.

Le temps compris entre les deux premiers zéros est mesuré par 25 divisions de la vis; il est donc égal à $0^s,0000045 \times 25$, soit $0^s,000112$.

Les autres instants où la différence de potentiel a été nulle sont séparés les uns des autres par des temps représentés par les nombres de divisions 16, 17, 17, 18, 17. On peut donc dire que les oscillations sont isochrones, et durent un temps égal à $0^s,0000045 \times 17 = 0^s,000076$.

2° Influence du nombre des épaisseurs de spires de la bobine inductrice. — Dans les tableaux qui vont suivre, la bobine induite et le dispositif général seront les mêmes que dans le cas précédent. Il n'y aura de différence que dans la bobine inductrice, qui sera successivement de une, deux, trois et quatre épaisseurs de spires. Ainsi que je l'ai dit, le courant inducteur sera ramené, à chaque changement de bobine, à la même intensité galvanométrique au moyen du rhéocorde.

TABLEAU II.

Bobine à une épaisseur.

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.	
1-10	0.....	0.
11	Impulsion de 10.....	à droite.
20	» forte.....	»
23	» »	»
2-0	»	»
3	0.....	0.
4	Impulsion de 12.....	à gauche.
10	» 140.....	»
13	»	»
14	0.....	0.
15	Impulsion.....	à droite.
20	»	»
3-0	0 (légèrement à droite).....	0.

TABLEAU II (*suite*).

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.
1	Impulsion..... à gauche.
7	» »
12	0..... 0.
13	Impulsion à droite.
18	» »
23	» (très-légère)..... »
24	0..... 0.
4- 0	Impulsion à gauche.
6	» (80)..... »
10	0..... 0.
	etc.

TABLEAU III.

Bobine à deux épaisseurs.

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.
1-10	0.
11	Impulsion légère..... à gauche.
12	» (25)..... »
13	» (35)..... »
14	» »
15	» »
2- 0	» très-forte..... »
2	» (130)..... »
3	» (80)..... »
4	0 (tendance à droite)..... 0.
5	Impulsion (40)..... à droite.
10	» »
11	» (forte)..... »
12	» (très-forte)..... »
14	» faible..... »
15	0..... 0.
16	Impulsion..... à gauche.
22	» (140)..... »
3- 2	0..... 0.
3	Impulsion de 15..... à droite.
9	» »
14	0..... 0.
20	Impulsion (130)..... à gauche.
4- 0	0..... 0.
6	Impulsion..... à droite.

TABLEAU III (*suite*).

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.	
11	0.....	0.
12	Impulsion.....	à gauche.
16	» (100).....	»
21	»	»
22	0.....	0.
23	Impulsion.....	à droite.
	etc.	

TABLEAU IV.

Bobine à trois épaisseurs.

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.	
1-10	0.	
11	Impulsion légère.....	à gauche.
12	» (35).....	»
18	Le trait sort de l'échelle.....	»
2- 3	0.....	0.
5	Impulsion.....	à droite.
11	»	»
13	»	»
14	0.....	0.
15	Impulsion.....	à gauche.
20	» très-forte.....	»
3- 0	0.....	0.
5	Impulsion forte.....	à droite.
11	0.....	0.
	etc.	

TABLEAU V.

Bobine à quatre épaisseurs.

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.	
1-10	0.	
11	Impulsion de 20.....	à gauche.
18	Le trait sort de l'échelle.....	»
2- 3	0.....	0.
8	Impulsion (200).....	à droite.
13	» (35).....	»
14	0.....	0.
15	Impulsion de 50.....	à gauche.
3- 0	0.....	0.
	etc.	

Le relevé de vitesses se rapportant à la série de ces quatre tableaux présente 27 points dans 120 millimètres; d'où, pour le temps d'une division,

$$\theta = \frac{1}{15700} \frac{3}{119} \frac{120}{27} = 0^s,000007.$$

Si l'on examine ces tableaux, on constate immédiatement que tous les zéros se reproduisent exactement aux mêmes points. Ainsi la position des zéros de la courbe est indépendante du nombre des couches du fil de la bobine inductrice, au moins quand ce nombre ne dépasse pas 4.

Si maintenant nous calculons les valeurs de temps qui séparent ces zéros, nous les trouvons mesurées, pour le premier intervalle, par 17 divisions de la vis, d'où

$$0^s,000007 \times 17 = 0^s,000119;$$

les oscillations isochrones durent ensuite un temps mesuré par 11 divisions, d'où

$$0^s,000007 \times 11 = 0^s,000077.$$

Le tableau I, qui a été dressé plus d'un mois avant ceux qui précèdent, nous avait fourni, pour les temps correspondants,

$$0^s,000112 \text{ et } 0^s,0000765.$$

3° *Influence de la bobine induite.* — Le tableau suivant a été obtenu avec l'appareil d'induction à 7260 tours de spires, que m'a fabriqué M. Ruhmkorff. La pile inductrice est la même; la bobine inductrice est à 4 épaisseurs.

TABLEAU VI.

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.	
1-10	0.	
11	Impulsion de 40.....	à gauche.
12	» forte.....	»
13	» »	»
14	» moindre.....	»
15	» (20).....	»
16	» (50).....	à droite.
18	»	»
19	Impulsion.....	à gauche.

TABLEAU VI (*suite*).

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.	
20	» (très-forte).....	»
21	»	»
22	Oscillations autour de.....	0.
23	Impulsion forte.....	à droite.
2- 0	Oscillations, puis.....	0.
$\frac{1}{2}$	Impulsion.....	à gauche.
1	»	»
2	» (forte).....	»
3	Hésitation.....	»
$3\frac{1}{2}$	0.....	0.
	etc.	

La vitesse était la même qu'aux tableaux précédents. Nous retrouvons ici les mêmes caractères généraux que plus haut, à savoir un premier intervalle plus long que ceux, égaux, qui le suivent. Mais les uns et les autres sont beaucoup plus courts que quand nous opérions avec l'autre bobine induite. Ainsi le premier est représenté par 5 à $5\frac{1}{2}$ divisions de la vis, les autres par une moyenne de 3,2, ce qui, en temps, correspond à $0^s,000007 \times 5 = 0^s,000035$ pour le premier, et $0^s,000007 \times 3,2 = 0^s,000022$.

En laissant de côté la première branche de courbe, que l'on peut envisager comme correspondant à l'impulsion initiale que donne le projectile au pendule balistique, il paraît *a priori* que la durée de chacune des oscillations qui suivent (durée que nous verrons tout à l'heure être indépendante des intensités) ne saurait être fonction que de ce qui caractérise le fil induit, sa longueur, son diamètre, sa nature, la disposition de ses diverses parties. Je me propose d'essayer de résoudre cette question, qui exige des possibilités d'arrangement et d'étude du fil induit que je n'ai pu encore réaliser. En attendant, les nombres qui précèdent présentent une relation bien remarquable, sur laquelle je n'ose pas insister, vu le trop petit nombre de cas examinés, mais que je ne puis m'empêcher de signaler.

Les durées d'une oscillation, pour les deux bobines induites, sont proportionnelles aux quotients de la longueur des deux fils par leur diamètre ou leur périmètre. Ces longueurs sont en effet, comme on l'a

vu, 2500 et 1200 mètres; les diamètres, 0^{mm},25 et 0^{mm},4; le rapport $\frac{2500}{0,25} : \frac{1200}{0,4}$ est, par suite, 3,3; le rapport des durées est $\frac{76}{22} = 3,4$. Les deux fils induits étant de même substance, on doit encore trouver le même nombre pour le rapport des produits des résistances électriques ordinaires par le diamètre; et en effet, on a

$$\frac{942 \times 0,25}{164 \times 0,4} = 3,5.$$

4° *Influence de l'intensité du courant inducteur.* — La bobine induite est celle de M. Ruhmkorff du tableau VI : la bobine inductrice est à 4 épaisseurs. Au lieu d'être fourni par l'élément Daniell moyen modèle ordinaire, le courant inducteur est produit par un élément Daniell grand modèle, qui porte la déviation galvanométrique mesurant ce courant, de 80 à 250 : l'intensité se trouve ainsi largement triplée.

TABLEAU VII.

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.	
1-10	0.	
11	Impulsion de 100.....	à gauche.
12	» (250).....	»
13	»	»
14	» (360).....	»
15	» (130).....	»
16	» (150).....	à droite.
18	»	»
19	»	à gauche.
21	»	»
22	0.....	0.
2- 0	0.....	0.
2	Impulsion forte.....	à gauche.
3	»	»
4	» (200).....	à droite.
5	»	»
7	Oscillations, puis.....	0.
8	Forte impulsion.....	à gauche.
11	Impulsion.....	à droite.
	etc.	

Si l'on compare ce tableau au précédent, on voit que ni la position

du premier zéro, ni celles des zéros suivants, ne sont modifiées par une multiplication par 3 de l'intensité du courant inducteur.

5° *Effet du fer doux introduit dans la bobine inductrice.* — Tous les résultats qui précèdent se rapportent à un système d'induction absolument dépourvu de pièces de fer. Il peut paraître intéressant de savoir quelles modifications seraient apportées au phénomène par l'introduction de fer doux dans l'intérieur de la bobine. Je n'ai point traité cette question avec la même multiplication d'expériences que les autres, pour deux motifs : d'abord parce que je la crois digne d'un travail tout spécial ; ensuite, parce que le fer doux produit une telle augmentation dans l'intensité des phénomènes, que j'ai craint d'y soumettre le magnifique instrument que m'ont construit MM. Brünner. Je vais néanmoins rapporter quelques expériences qui donneront une idée de cet important côté de la question.

Avant de dresser le tableau qui va suivre (2 juin 1876), les expériences relatives à l'appareil sans morceaux de fer furent répétées. La pile inductrice était le Daniell demi-grandeur ordinaire, rempli seulement au quart ; la bobine induite était celle à 13860 tours, la bobine inductrice à deux épaisseurs.

Le premier mouvement de l'aiguille de l'électromètre se produisait quand la vis micrométrique marquait 1-6 ; un maximum d'environ 250 avait lieu vers 1-14, et le premier zéro entre 1-17 et 1-18, soit après $12\frac{1}{2}$ divisions du limbe ; la déviation avait alors lieu en sens inverse, un maximum de 210 vers 1-22 et zéro à 2-1, soit après $8\frac{1}{2}$ divisions. Le relevé de vitesse donnait 15 points dans 87 millimètres ; d'où

$$\theta = \frac{1}{15700} \frac{3}{119} \frac{87}{15} = 0^s,000009,$$

et, par suite, la durée de la première branche de courbe était $0^s,000112$, et la durée commune aux branches suivantes, $0^s,000076$, chiffres bien concordants avec ceux déjà cités.

Tout en restant dans le même état, j'introduisis dans la bobine inductrice des morceaux de fils de fer de 1 millimètre de diamètre, et de même longueur que cette bobine, successivement au nombre de 10, 20 et 40, et c'est ainsi que furent obtenus les trois tableaux suivants :

TABLEAU VIII.

Dix fils de fer dans la bobine.

Vis micrométrique.

Déviations de l'aiguille.

1- 5	0.	
6	Impulsion de 20.....	à gauche.
8	» 150.....	»
10	Le trait sort de l'échelle.....	»
12	»	»
14	»	»
16	»	»
18	Impulsion de 250.....	»
20	» 100.....	»
21	Quelques oscillations, puis...	0.
22	Impulsion de 80.....	à droite.
24	» 250.....	»
2- 1	» »	»
2	» 100.....	»
3	» 80.....	»
4	0.....	0.
5	Impulsion.....	à gauche.
10	»	»
12	»	»
13	0.....	0.
	etc.	

TABLEAU IX.

On ajoute dans la bobine 10 morceaux de fer semblables à ceux qui y sont déjà, ce qui fait en tout 20.

Vis micrométrique.

Déviations de l'aiguille.

1- 5	0.	
6	Impulsion légère.....	à gauche.
15	Sort du champ.....	»
20	Impulsion de 150.....	»
21	» 50.....	»
22	0.....	0.
23	Impulsion de 40.....	à droite.
2- 2	» 250.....	»
4	» 80.....	»
5	0.....	0.
9	Impulsion de 150.....	à gauche.
12	» 100.....	»
13	» 50.....	»
14	0.....	0.
15	»	à droite.
	etc.	

TABLEAU X.

On ajoute 20 morceaux de fer semblables, en tout 40.

Vis micrométrique.	Déviations de l'aiguille.	
1- 5	0.	
6	Impulsion de 50.....	à gauche.
15	Sort du champ.....	»
20	Impulsion de 300.....	»
22	» 150.....	»
23	» 50.....	»
24	0.....	0.
2- 4	Impulsion de 200.....	à droite.
6	» 180.....	»
8	» 30.....	»
9	» 60.....	à gauche.
14	» 150.....	»
16	»	»
17	» légère.....	»
18	0.....	0.
	etc.	

De l'examen de ces trois tableaux et de leur comparaison avec les résultats déjà obtenus, ressort immédiatement le fait suivant : la présence du fer doux augmente la durée qui sépare les deux premiers zéros, et cela d'autant plus qu'il y a plus de fer, mais paraît sans influence sur la distribution des zéros suivants. En effet, tandis que la durée de la première branche de courbe était marquée par $12\frac{1}{2}$ divisions de la vis lorsqu'il n'y avait pas de fer, elle l'est par 16 quand il y a 10 morceaux de fil, par 17 avec 20, et par 19 avec 40; ou, en convertissant en secondes : $0^s,000112$ sans fer, $0^s,000144$ avec 10 fils, $0^s,000153$ avec 20, et $0^s,000171$ avec 40.

Quant aux intervalles qui séparent les zéros suivants, on les voit toujours correspondre à un nombre moyen de $8\frac{1}{2}$ divisions, qu'il y ait ou non des fils dans la bobine.

Détermination de la valeur des différences de potentiel aux extrémités du fil induit.

C'était là, si l'on veut bien s'en souvenir, le but primitif que je m'étais proposé. Je l'ai abandonné un instant pour l'étude du phénomène

oscillatoire au point de vue du temps, d'abord à cause de l'intérêt même de cette étude, ensuite parce qu'elle m'a conduit à des perfectionnements successifs du dispositif expérimental, que je n'ai arrêtés que quand les expériences ont pris la netteté dont on a déjà pu juger par les quelques tableaux rapportés plus haut. Or j'estime, et l'on s'en convaincra quand on aura vu les résultats qui vont suivre, que toute méthode expérimentale de mesure des tensions induites à l'état de circuit ouvert, qui n'a pas mis nettement en évidence le phénomène oscillatoire, n'a pu fournir que des chiffres dépendant absolument du nombre de circonvolutions de la courbe saisies à chaque instant, chiffres devant par conséquent être rejetés.

Lorsque je commençai ces mesures de quantités, je fus assez longtemps arrêté par une particularité qui se présenta sous la forme suivante : Je me servais exclusivement de la bobine à 13860 tours, la seule que j'eusse alors à ma disposition ; or, quand je traçais les courbes représentant les données successives de l'électromètre à tous les instants, je trouvais toujours une dissymétrie en faveur d'un côté ou de l'autre de l'axe des temps, dissymétrie d'autant plus marquée, que les différences de potentiel étaient plus considérables. Après bien des recherches, je fus conduit à en chercher la cause dans l'électromètre lui-même, et à voir si une même différence de potentiel ne pouvait pas se traduire par des déviations différentes, selon la valeur absolue de l'un de ces potentiels. C'est dans le même temps que j'eus connaissance de la formule de M. Mascart, et que, tout en la vérifiant, je me dressai les Tables que j'ai en partie rapportées plus haut, et qui devaient lever la difficulté qui m'arrêtait. Cette difficulté a eu pour résultat de me permettre d'établir le fait suivant : Quand une bobine induite est formée d'un seul fil, dont un des bouts est dans la profondeur de l'enroulement, tandis que l'autre en occupe l'extérieur, le premier bout reste constamment à un potentiel à peu près nul, et le bout extérieur seul prend des potentiels successifs égaux, par conséquent, à la différence même constatée entre les deux.

C'est pour vérifier ce fait que j'ai dressé avec soin les Tables analogues à celle de la page 218, et c'est pour avoir des résultats concordants que j'ai imaginé de charger l'aiguille successivement au même potentiel positif ou négatif ; la demi-somme des déviations obtenues

représente alors, ainsi qu'il résulte de la formule de M. Mascart et que je l'ai vérifié, la vraie différence de potentiel, et de plus les chiffres obtenus chaque fois, comparés à ceux de la page 218, renseignent sur les valeurs absolues des potentiels, en ce sens que, si l'un des pôles a le potentiel zéro, les deux nombres obtenus seront chaque fois ceux des lignes 2, 3 du tableau précité.

Voici un extrait d'expériences faites sur ce sujet (2 juin 1876). La pile de charge était formée de 50 éléments zinc-cuivre-eau bouillie, constitués par des flacons à large col de 40 centimètres cubes environ chacun : les soudures reposaient, comme dans la disposition ordinaire dite à *tasses*, sur les cols soigneusement vernis de deux flacons consécutifs ; les 20 éléments Daniell d'essai donnaient une déviation de 175 de chaque côté, du moins quand leur milieu était relié au sol, comme on va le voir.

Essai préalable avec les 20 Daniell.

Pôle positif des Daniell au sol ;

Charge de l'aiguille positive ; équilibre de l'aiguille : 140 à gauche ;

Charge de l'aiguille négative ; équilibre de l'aiguille : 210 à droite.

Moyenne : 175.

Milieu des Daniell au sol ; déviation de l'aiguille à l'équilibre : 175 à droite ou à gauche, selon le signe de la charge.

Voici maintenant les résultats obtenus avec la bobine ; les déviations ne sont plus ici simplement des impulsions, comme dans les tableaux du Chapitre précédent, mais des positions d'un équilibre maintenu assez longtemps stable, surtout dans les endroits peu éloignés des maxima, les seuls que je donnerai.

TABLEAU I.

Vis micrométrique.	Charge de l'aiguille.	Déviation de l'aiguille à l'équilibre.	Moyennes.
1-10	-	160 à gauche.	135
	+	110 à droite.	
14	-	250 à gauche.	204
	+	158 à droite.	
19	-	86 à droite.	98
	+	110 à gauche.	

TABLEAU I (*suite*).

Pour m'assurer que ces résultats ne tiennent pas à une dissymétrie quelconque des appareils, j'intervertis les attaches des extrémités du fil induit avec le disjoncteur.

Vis micrométrique.	Charge de l'aiguille.	Déviatiou de l'aiguille à l'équilibre.	Moyennes.
19	{ —	85 à gauche.	97,5
	{ +	110 à droite.	
20	{ —	100 à gauche.	120
	{ +	140 à droite.	
22	{ —	120 à gauche.	150
	{ +	180 à droite.	
23	{ —	150 à gauche.	195
	{ +	240 à droite.	
2- 0	{ —	80 à gauche.	120
	{ +	160 à droite.	
4	{ —	140 à droite.	125
	{ +	110 à gauche.	
5	{ —	180 à droite.	150
	{ +	120 à gauche.	
10	{ —	72 à gauche.	86
	{ +	100 à droite.	
12	{ —	110 à gauche.	140
	{ +	170 à droite.	

Si l'on examine les différents couples de nombres de ce tableau, on y voit une concordance complète avec ceux des expériences numérotées 2, 3, dans le tableau de la page 218, lesquels se rapportent, comme on sait, au cas d'un pôle au sol. Il ne paraît se produire quelques différences que lorsqu'on se rapproche des points zéro, et la difficulté de maintenir l'aiguille fixe en ces endroits, où la différence de potentiel varie extrêmement vite avec le temps, explique très-bien ces divergences. Du reste, en admettant que, au moment où va se produire l'oscillation, je ne sois pas absolument certain si le bout noyé du fil ne prend pas une valeur fugitive et petite de potentiel, le tableau qui précède permet d'affirmer que cette valeur est nulle, lorsque la différence de potentiel arrive non loin de ses valeurs maxima, et à ces valeurs.

Ce fait, qui m'avait arrêté bien longtemps, ne surprit point du

tout M. Ruhmkorff, qui savait fort bien, m'a-t-il dit, que ses bobines non cloisonnées, c'est-à-dire non symétriques, présentent, pour me servir de ses propres expressions, « un pôle zéro et un pôle tension ». La même chose me fut dite par M. Edm. Becquerel, vice-président de la Société de Physique, après une communication que j'avais faite à la Société d'une partie des résultats de ce travail. Je l'ai retrouvé aussi dans toutes les études faites avec les premiers appareils de M. Ruhmkorff, dont l'enroulement était uniforme. « Quand on présente à l'extrémité superficielle de la spirale induite un conducteur qui ne fait pas partie du circuit, on peut obtenir des étincelles à distance. L'extrémité profonde de la spirale ne fournit jamais d'étincelle dans de pareilles circonstances. La tension électrique n'est donc pas la même aux deux extrémités du fil; celle du bout superficiel est beaucoup plus considérable que celle du bout profond. Cette inégalité bien constatée est due à un phénomène de condensation. Les parties centrales de l'appareil constituent un condensateur dont la lame isolante est représentée par le tube de verre placé entre les deux bobines, et dont les armures sont, d'une part la spirale inductrice et la masse métallique de l'électro-aimant ⁽¹⁾, d'autre part, les couches profondes de la bobine induite. On comprend ainsi comment l'électricité est condensée sur les couches centrales du fil induit, et pourquoi la tension de l'extrémité superficielle de la bobine induite est très-supérieure à celle de son extrémité profonde ⁽²⁾. »

C'est afin que je pusse mettre en évidence l'influence des dispositions d'enroulement du fil induit que M. Ruhmkorff eut la gracieuseté de me faire construire la seconde bobine dont j'ai parlé plus haut.

Voici quelques résultats obtenus avec cet instrument dans l'ordre de faits qui nous occupe.

⁽¹⁾ Ces masses métalliques ne sont pas nécessaires pour produire l'effet en question, puisqu'il n'y en avait pas dans les expériences qui ont fourni le tableau I.

⁽²⁾ GAVARRET, *Traité d'électricité*, t. II, p. 305 (1858).

TABLEAU II.

La bobine induite est formée de deux bobines identiques réunies en une seule par la jonction de leurs extrémités noyées dans la masse de l'enroulement. La bobine inductrice est à deux épaisseurs.

Vis micrométrique.	Charge de l'aiguille.	Déviation de l'aiguille à l'équilibre.	Moyennes.
1- 8	{ -	20 à gauche.	20
	{ +	20 à droite.	
10	{ -	120 à gauche.	120
	{ +	120 à droite.	
11	{ -	150 à gauche.	150
	{ +	150 à droite.	
12	{ -	96 à gauche.	98
	{ +	100 à droite.	
13	{ -	Oscillations, puis o.	o
	{ +	»	
15	{ -	136 à droite.	138
	{ +	140 à gauche.	
16	{ -	40 à droite.	45
	{ +	50 à gauche.	

etc.

On voit que le changement de signe de la charge entraîne chaque fois le changement de sens de la déviation, sans modifier sa valeur, preuve que les deux potentiels sont égaux et de signe contraire.

TABLEAU III.

Les deux bobines constituant l'appareil d'induction sont reliées par leurs extrémités superficielles, de sorte que le système est encore symétrique, mais les extrémités libres du fil induit sont celles qui sont noyées dans la masse de l'enroulement.

Vis micrométrique.	Charge de l'aiguille.	Déviation de l'aiguille à l'équilibre.	Moyennes.
1-11	{ -	155 à gauche.	156
	{ +	157 à droite.	

Je me borne au premier maximum et, toutes les autres dispositions restant les mêmes, je remets le système dans l'état précédent.

1-11	{ -	160 à gauche.	160
	{ +	160 à droite.	

Je fais communiquer au sol une des extrémités du fil induit.

1-11	{ -	122 à gauche.	158
	{ +	196 à droite.	

etc.

On voit, par le tableau précédent, que la symétrie de disposition de la bobine induite entraîne la symétrie dans la distribution des potentiels; on voit de plus que le premier maximum atteint une valeur toujours la même, quelle que soit la disposition.

Dans le cas d'une communication avec le sol, le pôle relié au sol est à zéro, l'instrument l'indique; mais la différence de potentiel des deux extrémités reste encore la même.

Les mêmes expériences furent répétées avec la même bobine placée dans la deuxième disposition; elles conduisirent au même résultat.

Je les répétai également avec la bobine à 13860 tours⁽¹⁾: le pôle intérieur étant mis au sol, les résultats étaient absolument les mêmes, ce qui n'a rien d'étonnant; mais, lorsque j'y mettais le pôle extérieur, je constatais encore le même écart entre les déviations correspondant aux deux charges de l'aiguille. Seulement la supériorité était en sens inverse, c'est-à-dire que, si, dans le cas des extrémités libres, la déviation la plus forte correspondait à la charge positive de l'aiguille par exemple, cela avait encore lieu lorsque l'extrémité noyée communiquait au sol; mais, lorsque c'était l'autre extrémité qui était jointe à la terre, la plus forte déviation de l'aiguille était donnée par la charge négative, conséquence naturelle de la théorie de l'électromètre vue plus haut; et, dans tous les cas, la moyenne des deux déviations, qui, comme nous l'avons vu, mesure la vraie différence de potentiel, était toujours la même.

Il paraît donc n'y avoir là qu'une affaire de capacité relative des différentes parties du fil, due au fait du voisinage des diverses spires, de leur situation réciproque. Dans tous les cas, la différence de potentiel entre les extrémités du fil demeure indépendante du mode de distribution des valeurs absolues de ce potentiel, et, quand on ne voudra mesurer que ces différences, on n'aura pas besoin de s'enquérir des valeurs absolues, à moins toutefois que les données de l'instrument de mesure ne soient, comme cela avait lieu dans le cas actuel, dépendantes à la fois et de ces différences et des valeurs absolues.

Toutes les déviations qui vont suivre seront toujours corrigées de

(1) C'est pour répondre aux bienveillantes observations de M. Jamin que j'insistai ainsi sur ces intéressantes conséquences du mode de construction de la bobine induite.

l'erreur de l'instrument, c'est-à-dire qu'on les ramènera à ce qu'aurait fourni l'instrument, si les deux potentiels dont elles doivent mesurer la différence avaient été égaux et de signe contraire.

Cette correction sera faite tantôt par la méthode du changement de signe de la charge de l'aiguille, tantôt, cette charge n'étant pas modifiée, par les Tables de la page 218, où le nombre des lignes 1 sera mis à la place de l'un ou l'autre de ceux des lignes 2 et 3, selon les indications fournies par un changement de charge opéré au début. La charge conservée donnera, en général, les plus grandes déviations.

On comprend maintenant que, grâce à ces corrections, je n'aie eu besoin de tracer la courbe de graduation de l'électromètre que pour le cas de deux potentiels égaux et de signe contraire, auquel tous les autres se trouvent ainsi ramenés.

Étude de la première branche de courbe.

Je crois que les valeurs de la différence de potentiel qui forment la première boucle de la courbe que je me suis proposé d'étudier doivent avoir une intime relation avec les phénomènes de courant ou d'étincelle, sous lesquels on a coutume de manifester et d'utiliser le fait de l'induction électrodynamique. C'est à cause de cela que j'ai suivi tout spécialement cette marche première du phénomène, et que j'ai cherché à établir quelques-unes des lois qui la peuvent modifier.

J'examinerai successivement l'influence du nombre des couches du fil de la bobine inductrice, celle de l'intensité du courant inducteur; je donnerai aussi quelques chiffres qui montreront l'action puissante du fer doux sur l'intensité du phénomène.

1° *Influence du nombre des couches de fil de la bobine inductrice.* — Il a été employé successivement les quatre bobines inductrices à une, deux, trois et quatre épaisseurs, décrites plus haut : le courant inducteur était fourni par le Daniell moyen modèle, rempli à une hauteur de 8 centimètres. Sa résistance est 4^{us}, 5; la résistance des différents fils de jonction, y compris le disjoncteur fermé, est 0^{us}, 05; la bobine d'une seule épaisseur (résistance 0^{us}, 216) étant en expérience, on met un Siemens au rhéocorde. Ainsi le courant inducteur a pour force électromotrice un Daniell, et pour résistance totale 5^{us}, 760.

La déviation galvanométrique destinée à mesurer son intensité est 70 d'un côté, 75 de l'autre, en tout 145; à chaque changement de bobine inductrice, il sera touché au rhéocorde, de façon à ramener cette intensité à la même valeur.

Les 20 Daniell d'essai donnent à l'électromètre, leur milieu étant au sol, 50 de chaque côté, en tout 100.

La bobine induite est celle de 13860 tours.

TABLEAU IV.

Vis micrométrique.	Déviation observée. (maxima).	Déviation corrigée et doublée.	Ordonnées correspondantes de la courbe de l'électromètre.	Valeurs en Daniell.
Bobine inductrice à une seule épaisseur.				
1- 5	0.	0	0	0
7	15 à droite.	30	30	6
11	50 »	92	92	18
20	75 »	140	140	28
30	0.	0	0	0
Bobine inductrice à deux épaisseurs.				
1-10	50 à droite.	94	94	19
15	130 »	226	236	47
21	160 »	280	307	61
26	130 »	226	236	47
30	0.	0	0	0
Bobine inductrice à trois épaisseurs.				
1- 8	40 à droite.	76	76	15
18	220 »	364	442	88
21	250 »	404	520	104
24	210 »	348	415	83
30	0.	0	0	0
Bobine inductrice à quatre épaisseurs.				
1- 8	50 à droite.	94	94	19
21	340 »	520	750	150
30	0.	0	0	0

J'ai appelé, dans ce tableau, *déviation corrigée* les déviations qui auraient été observées si la même différence de potentiel avait existé entre deux points de potentiels égaux et de signes contraires. Je les ai

doublées, parce que la courbe de graduation de l'électromètre, que je m'étais construite, se rapportait à la somme des déviations droite et gauche. Les 20 Daniell donnant 50 de chaque côté, c'est-à-dire une déviation double de 100, à laquelle correspond à l'électromètre une ordonnée égale à 100, les valeurs de la dernière colonne ont été déduites de celles de sa voisine par la multiplication par le rapport $\frac{20}{100}$.

Je n'ai donné, dans le tableau qui précède, que quelques nombres, bien fixes, et surtout les maximum.

Si l'on jette les yeux sur les nombres qui expriment en Daniell les différences de potentiel observées, on est tout de suite frappé par leur grande valeur, eu égard à la faiblesse du courant qui les a produites. On voit, en outre, que les maxima ont lieu tous à peu près au même instant après la rupture, et l'on voit de plus, que les valeurs de ces maxima croissent beaucoup plus vite que proportionnellement au nombre de couches du fil constituant la bobine inductrice. On a, en effet, les nombres successifs 28, 61, 104, 150, dont les rapports sont comme 1—2,2—3,7—5,3, tandis que les épaisseurs de fils sont entre elles comme 1-2-3-4.

Mais si l'on construit les courbes représentant aux instants successifs les différences de potentiel de la cinquième colonne, et qu'on estime l'aire comprise entre chacune d'elles et l'axe des temps, on trouve, pour les courbes correspondant aux séries que je viens de rapporter, le temps θ d'une division du limbe de la vis étant représenté par la même longueur qui, en ordonnées, représente 5 Daniell, sensiblement les quatre nombres suivants :

$$90, \quad 182, \quad 300, \quad 393.$$

qui sont entre eux comme 1—2—3,3 et 4,3.

Si l'on réfléchit à la difficulté que présentent à la stabilité d'équilibre de l'aiguille les points un peu éloignés des maximum, cette exactitude pourra paraître suffisante pour énoncer la loi suivante :

Si l'on désigne par θ la durée comprise entre le début du phénomène et l'instant où se produit le premier zéro, par E la différence de potentiel fonction du temps correspondant aux différents instants de cette durée, l'intégrale $\int_0^\theta E dt$ est proportionnelle, toutes choses restant les

mêmes, aux nombres de couches formées par les spires du fil de la bobine inductrice.

Je dois ajouter que la différence que présentent les rapports précédents, $1-2-3,3-4,3$ avec les nombres 1, 2, 3, 4 qui exprimeraient rigoureusement cette proportionnalité, différence que je crois de l'ordre des erreurs d'observation, s'est néanmoins toujours produite plutôt en plus qu'en moins; et pourtant, la bobine inductrice conservant toujours le même diamètre extérieur, les spires devenaient moins longues et s'éloignaient du fil induit, à mesure qu'elles appartenaient à une couche plus profonde, le fil inducteur ayant, on s'en souvient, 1 millimètre de diamètre, plus la couche de soie isolante.

2° *Influence de l'intensité du courant inducteur.* — J'ai déjà dit comment se mesurait l'intensité du courant inducteur et comment la petitesse des déviations du galvanomètre permettait de considérer comme rigoureuse la proportionnalité de cette intensité aux longueurs interceptées sur l'échelle par le trait lumineux.

Dans la série d'expériences que je vais rapporter, la bobine inductrice était à une seule épaisseur de fils; la bobine induite était celle de 13860 tours.

La pile Daniell fournissant le courant inducteur était d'abord remplie de liquides à une hauteur de 4 ou 5 centimètres environ; et, le rhéocorde aidant, la déviation galvanométrique était amenée à 50 de chaque côté. L'intensité a été successivement amenée à 100 et 150 de chaque côté, c'est-à-dire doublée et triplée par des additions convenables de liquides dans la pile et à l'aide du rhéocorde.

Les 20 Daniell donnent 150 de chaque côté à l'électromètre, quand leur milieu est au sol. Un intervertissement de charge de l'aiguille indiquant que c'est la charge négative qui fournit les plus grandes déviations, cette charge est laissée.

TABLEAU V.

Vis micrométrique.	Déviations observées.	Déviations corrigées et doublées.	Ordonnées correspondantes de la courbe de l'électromètre.	Valeurs en Daniell.
Courant inducteur d'intensité 1.				
1- 7	0	0	0	0
8	17 à gauche.	34	34	2
12	112 »	196	202	12
16	143 »	253	269	16
20	160 »	276	303	18
22	160 »	276	303	18
24	139 »	239	252	15
2- 5	0.	0	0	0
Courant inducteur d'intensité 2.				
1- 7	0	0	0	0
10	120 à gauche.	211	219	13
15	244 »	396	504	30
20	275 »	481	672	40
22	291 »	464	638	38
24	256 »	431	572	34
2- 5	0.	0	0	0
Courant inducteur d'intensité 3.				
1- 7	0	0	0	0
12	244 à gauche.	396	504	30
16	392 »	563	840	50
18	450 »	625	975	58
20	500 »	662	1060	63
22	500 »	662	1060	63
24	410 »	580	874	52
2- 5	0.	0	0	0

Les colonnes de ce tableau ont la même signification que celles du tableau IV; par suite d'un accroissement donné à la pile de charge, les 20 Daniell donnaient ici une déviation totale de 300; à ce chiffre correspond à la courbe de l'électromètre une ordonnée de 336. Les valeurs de la dernière colonne de droite ont donc été obtenues en multipliant les nombres correspondants de la colonne voisine par le rapport $\frac{20}{336}$.

Si l'on examine le tableau qui précède, on voit que les valeurs des

maxima sont encore loin de croître proportionnellement à l'intensité du courant inducteur. Ces valeurs sont en effet 18, 38 et 63, qui sont entre elles comme 1—2,1—3,5.

Si, prenant pour abscisses les temps, on construit, comme plus haut, la courbe dont les ordonnées seront les valeurs de la dernière colonne, on trouve sensiblement, la même longueur représentant en abscisses le temps d'une division du limbe de la vis micrométrique et en ordonnées la force électromotrice de 2 Daniell, les nombres 140, 281 et 428 pour les aires comprises entre ces courbes et l'axe des temps. Ces nombres sont entre eux comme 1, 2, 3.

Ainsi, pas plus que tout à l'heure, on n'entrevoit de relation simple entre les maxima et les intensités du courant inducteur; mais on peut énoncer la loi analogue suivante :

Si l'on désigne par θ le temps compris entre le début du phénomène et l'instant où se produit le premier retour au zéro, par E la différence de potentiel fonction du temps correspondant aux différents instants de cette période, l'intégrale $\int_0^\theta E dt$ est proportionnelle, toutes choses restant les mêmes, à l'intensité du courant inducteur.

3° *Influence du fer doux placé dans la bobine.* — J'ai étudié plus haut, avec quelque développement, l'influence du fer doux sur la distribution des zéros de la courbe des tensions. Je n'entreprendrai pas ici l'étude complète au point de vue des intensités, parce qu'elle mérite un travail spécial et que, comme on va le voir, les différences de potentiel prennent tout de suite des valeurs si considérables, qu'il serait nécessaire de modifier la sensibilité des appareils.

Voici seulement un tableau, se rapportant toujours à la première branche de courbe : il a été dressé le même jour que celui qui précède (8 juin 1876); on pourra, par conséquent, l'en rapprocher. Le courant inducteur est fourni par le Daniell moyen rempli à 4 centimètres, et marquant 50 au galvanomètre; la bobine inductrice est à une épaisseur; on y introduit 10 morceaux de fil de fer de 1 millimètre de diamètre, déjà employés.

TABLEAU VI.

Vis micro- métrique.	Déviations observées.	Déviations corrigées et doublées.	Valeurs correspondantes de la courbe de l'électromètre.	Valeurs en Daniell.	Valeurs en Daniell sans fils de fer.
1- 7	0	0	0	0	0
9	50 à gauche.	96	96	6	5
12	230 »	376	465	27,5	12
16	370 »	550	812	48	16
20	380 »	560	832	49,5	18
24	370 »	550	812	48	15
2- 5	230 »	376	465	27,5	0
8	150 »	260	278	16,5	Changement
12	40 »	76	76	4,5	de signe,
13	0.	0	0	0	etc.

Si l'on jette les yeux sur les deux colonnes à droite de ce tableau, on voit d'abord le zéro se produire, dans celle qui se rapporte au cas des fils de fer, plus tard que dans l'autre, résultat déjà connu.

Le maximum a lieu à peu près au même instant dans l'une et dans l'autre, l'allongement de la courbe produit par le fer paraissant ainsi consister surtout dans un ralentissement de la chute au zéro. La différence des valeurs de ces maxima est frappante : l'une atteint presque 50 Daniell, tandis que l'autre n'en dépasse pas 18.

Mais une différence bien plus considérable encore se manifeste, si l'on fait, dans les deux cas, l'intégrale $\int_0^{\theta} E dt$, que nous avons été conduit à considérer dans les expériences précédentes. Quand il n'y a pas de fils de fer, la valeur de cette intégrale étant représentée par le nombre 140, l'est par le nombre 457, quand la bobine contient seulement 10 morceaux de fil de fer, résultat du double allongement de la courbe, à la fois dans le sens de l'axe des abscisses et dans celui de l'axe des ordonnées.

Tracé de six boucles de la courbe figurative des différences successives de potentiel que présentent les extrémités de la bobine induite ouverte.

Je vais terminer l'exposé de ce travail par le tableau d'une des meilleures séries d'expériences, dans lesquelles, sans modifier les condi-

tions du phénomène, je l'ai suivi aussi loin que me l'a permis l'excellent instrument que m'ont construit MM. Brünner.

Afin de ne pas surcharger les colonnes du tableau qui va suivre des observations que porte mon cahier d'expériences, je ferai remarquer que l'équilibre de l'aiguille était assez difficile à maintenir pour les points avoisinant les zéros, ou d'une manière générale pour les points où la tangente à la courbe fait un angle un peu grand avec l'axe des temps, ce qui n'a rien de surprenant. Aussi mes Notes signalent, sur beaucoup de ces points, un mouvement oscillatoire de l'aiguille, qui finissait toujours par se renfermer dans un espace de 10 ou 20 divisions au plus de la règle où se faisaient les lectures; mais, dès que l'angle de la tangente avec l'axe des temps atteint les environs de 45 degrés, l'équilibre est très-net, et les chiffres sont exacts à une division près de cette règle. Dans les points incomplètement définis, j'ai mis le chiffre que leur assignait le tracé rectifié de la courbe.

TABLEAU VII.

Vis micro- métrique.	Déviation observées.	Déviation corrigées et doublées.	Ordonnées correspondantes de la courbe de l'électromètre.	Valeurs en Daniell.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1- 0	0	0	0	0
2	0	0	0	0
4	0	0	0	0
6	léger mouvement.	»	»	»
7	30 à droite.	60	60	7
8	76 »	140	140	17
10	110 »	196	202	25
12	150 »	260	279	34,4
14	200 »	332	386	47,6
16	220 »	360	436	53,7
18	235 »	394	500	61,7
20	230 »	380	472	58,2
22	215 »	352	422	52
24	160 »	274	298	36,8
2- 1	100 »	180	183	23,2
3	40 »	76	76	9
5	0	0	0	0
7	67 à gauche.	146	146	18
9	104 »	248	262	32,3

TABLEAU VII (*suite*).

Vis micro- métrique.	Déviations observées.	Déviations corrigées et doublées.	Ordonnées correspondantes de la courbe de l'électromètre.	Valeurs en Daniell.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
11	123 »	308	348	43
12	126 »	322	372	46
14	126 »	322	372	46
15	124 »	318	364	45
17	112 »	268	291	36
19	72 »	160	162	20
21	15 »	32	32	4
23	50 à droite.	96	96	12
3- 0	100 »	180	183	23,2
2	150 »	260	279	34,4
4	175 »	300	336	41,4
6	170 »	288	318	39,2
8	143 »	248	262	32,3
10	70 »	128	128	16
12	30 »	60	60	7
14	18 à gauche.	40	40	5
17	84 »	188	186	23
20	112 »	269	293	36,3
22	113 »	271	294	36,8
24	103 »	238	251	31
4- 1	80 »	182	191	23,6
3	44 »	97	97	12
5	0 »	0	0	0
7	50 à droite.	96	96	12
10	110 »	196	202	25
14	150 »	260	279	34,4
16	145 »	250	265	32,7
18	110 »	196	202	25
22	20 »	40	40	5
24	16 à gauche.	32	32	4
5- 2	72 »	156	157	19,4
7	105 »	242	256	31,6
10	90 »	200	206	25,4
13	45 »	96	96	12
16	40 à droite.	76	76	9

Ce tableau a été dressé le 3 mai 1876; la bobine induite était celle à 13860 tours; la bobine inductrice à deux épaisseurs de spire, sans fer

à l'intérieur. Le courant inducteur était fourni par le Daniell demi-grandeur, de résistance $4^{\text{ms}}, 5$; la résistance totale du reste du circuit, disjoncteur, rhéocorde, bobine inductrice, fils de jonction, était $1^{\text{ms}}, 5$. La charge de l'aiguille de l'électromètre était positive, et les 20 Daniell, reliés aux quadrants et leur milieu au sol, produisaient une déviation de 80 de chaque côté du zéro. Le temps correspondant à une division de la vis micrométrique était $0^{\text{s}}, 0000045$.

Je n'ai rien à dire sur la formation de ce tableau, qui est analogue à ceux que j'ai déjà transcrits. Les 20 Daniell donnant une déviation de 80 de chaque côté, ou de 160 doublée, ce qui correspond à une ordonnée de 162 à la courbe de l'électromètre, les nombres de la dernière colonne de droite ont été obtenus en multipliant ceux de l'avant-dernière par le rapport $\frac{20}{162}$.

Si, prenant pour abscisses les temps donnés par la colonne (1), on construit la courbe représentative des nombres de la colonne (2), c'est-à-dire des déviations observées de l'aiguille de l'électromètre, en prenant comme positives les déviations droites et négatives celles de gauche, on est frappé de la dissymétrie que présente cette courbe par rapport à l'axe des temps, toutes les boucles positives l'emportant de beaucoup sur les boucles négatives.

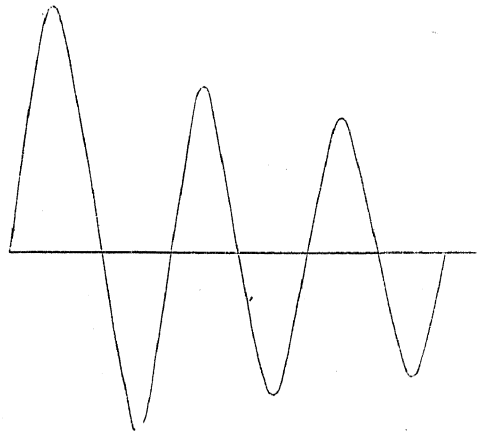
C'est cette dissymétrie que je retrouvais toujours, et qu'il me semblait impossible d'admettre, en dehors même de toute espèce d'hypothèse sur la nature des phénomènes électriques, qui m'a conduit, comme on l'a vu plus haut, à en rechercher la cause dans la distribution non symétrique du potentiel le long du fil, et l'influence de cette distribution sur les indications de l'électromètre.

La courbe dessinée (*fig. 10*) a été dressée en prenant pour abscisses les temps, et pour ordonnées les nombres de la cinquième colonne du tableau précédent; elle représente, par conséquent, les valeurs successives des différences de potentiel que présentent les deux extrémités de la bobine ouverte, quand est rompu le courant inducteur. $\frac{1}{2}$ millimètre sur la ligne des abscisses représente un temps égal à $0^{\text{s}}, 0000045$; la même longueur en ordonnées représente la force électromotrice de 1 élément Daniell.

On voit que la diminution des maxima successifs n'est pas très-

rapide; cette diminution doit tenir, soit aux pertes, soit plutôt aux résistances de nature inconnue que doit éprouver le mouvement électrique, par suite desquelles, suivant la conception de M. Helmholtz ⁽¹⁾, la force vive de ce mouvement doit se convertir peu à peu en chaleur.

Fig 10.



Il résulte de là que ce genre de mouvement, que j'ai déjà eu occasion de comparer, quant à son point de départ, avec celui du pendule balistique brusquement tiré du repos par le choc du projectile, peut lui être, aussi justement peut-être, comparé encore quant à sa durée et à son mode d'extinction. Conclusion, il est probable que le nombre des oscillations est théoriquement infini, ce qui revient à dire qu'on en trouvera d'autant plus qu'on les produira plus intenses et qu'on emploiera pour les observer des instruments plus sensibles. Et, en effet, dans mes premières expériences, en prenant pour pile inductrice 1 Daniell grand modèle, j'en ai compté jusqu'à 30, et la vingtième était encore marquée par une déviation de 160 à l'échelle de l'électromètre.

L'instrument de MM. Brünner ne me permet pas d'aller au delà des six branches de la *fig.* 10, la vis micrométrique n'ayant pas un chemin plus long : ce sont les considérations que je viens de présenter qui m'ont fait sacrifier la poursuite du phénomène à l'accroissement de

(¹) Voir l'*Historique*, plus haut, p. 202.

précision qui résulte toujours de l'emploi d'une vis micrométrique de peu d'étendue.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

I. Au moyen d'un disjoncteur spécial, les extrémités d'une bobine induite ouverte ont été mises en relation avec les quadrants d'un électromètre pendant des temps qui ont pu descendre jusqu'à 4 millièmes de seconde, et dont l'instant était rapporté à celui de la rupture du courant inducteur, avec une approximation certaine du même ordre de grandeur.

II. La machine électromagnétique de M. Gramme, employée comme machine motrice, a été accompagnée d'un régulateur permettant d'affirmer que, pendant plus de quatre minutes, la vitesse du mouvement ne variait pas du centième de sa valeur moyenne.

III. Il a été fait une étude complète de l'électromètre de M. Thomson, dans le cas où les potentiels des quadrants sont comparables, comme grandeur, au potentiel de la charge de l'aiguille.

Cette étude, éclairée par une formule empruntée à M. Mascart, a permis de constater, entre autres, les deux faits suivants :

1° Pour une même différence de potentiel entre deux points reliés aux quadrants, la déviation de l'aiguille dépend de la valeur absolue de ces potentiels; si l'on fait communiquer alternativement ces deux points au sol, leur différence de potentiel demeurant la même, la moyenne des déviations obtenues est sensiblement égale à celle qu'on obtient quand les deux potentiels sont égaux et de signe contraire;

2° Quelles que soient les valeurs absolues des potentiels des deux points liés aux quadrants, si l'on donne alternativement à l'aiguille des charges égales et de signe contraire par un intervertissement des pôles de la pile de charge, la moyenne des deux déviations obtenues est sensiblement égale à la déviation qu'aurait donnée l'instrument si les deux potentiels avaient été égaux et de signe contraire.

De ce second fait il a été tiré la conséquence pratique suivante : il suffit d'établir une courbe de graduation de l'instrument au moyen de piles ouvertes à milieu relié au sol; une double mesure rapidement faite, au moyen d'un commutateur à bascule interposé entre la pile de

charge et l'aiguille, donne deux nombres dont les moyennes se rapportent à la graduation établie; de plus, les valeurs relatives de ces deux nombres peuvent fournir d'utiles renseignements sur les valeurs absolues des potentiels mesurés, et ainsi ce qui pouvait paraître un inconvénient de ces charges, relativement faibles, présente, au contraire, un nouvel avantage.

Cette courbe de graduation a été dressée en suivant, au moyen de piles ouvertes, une marche tout à fait analogue à celle de la graduation du galvanomètre par la lentille à secteurs de MM. de la Provostaye et Desains. Une batterie de 20 éléments Daniell soigneusement entretenus servait à éliminer les variations qui pouvaient se produire dans la sensibilité de l'instrument ⁽¹⁾.

IV. Ce travail a conduit aux conclusions suivantes ⁽²⁾ :

1° Une différence de tension s'accuse entre les deux extrémités du fil induit, au bout d'un temps que je crois pouvoir affirmer moindre que 4 millièmes de seconde, après la rupture métallique du courant inducteur. Le retard observé par M. Blaserna dans la production du courant d'induction, lorsque les deux bobines sont séparées, serait donc insensible quand la bobine induite recouvre immédiatement la bobine inductrice.

2° Cette différence de potentiel va en croissant; elle est de sens tel que, si les deux extrémités du fil induit étaient réunies par un conducteur, elle donnerait lieu au courant induit direct des théories ordinaires de l'induction; il n'est pas douteux que ce serait elle qui produirait tout ou partie de l'étincelle, dite d'*induction*, au cas où les deux extrémités du fil induit ne seraient séparées que par une mince couche d'air, ou une colonne d'un gaz raréfié.

3° Aucun phénomène d'étincelle ou de courant n'ayant pu se produire, la différence de potentiel, après avoir atteint un certain maximum, diminue, retombe à zéro puis change de signe, atteint un nouveau maximum en sens inverse, pour revenir à zéro, et se reproduire en sens inverse, etc.; en un mot, elle oscille de part et d'autre de zéro jusqu'à ce qu'elle y retombe définitivement.

⁽¹⁾ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, du 10 juillet 1876, p. 144.

⁽²⁾ *Comptes rendus* du 12 juin 1876, p. 1388.

4° Les temps qui séparent deux zéros consécutifs sont rigoureusement égaux, à l'exception du premier, toujours plus long.

5° Ces temps diffèrent avec les bobines induites employées; mais, pour une bobine donnée, ils sont indépendants du nombre de spires qui composent la bobine inductrice et de l'intensité du courant inducteur, du moins dans les limites où j'ai opéré.

6° Si l'on met dans l'intérieur de la bobine inductrice des fils de fer doux, leur effet est d'allonger la première période seulement, les autres conservant la même valeur qu'auparavant. Ainsi la durée de cette première période a été portée, en prenant pour unité le millième de seconde que je désigne par σ , de $0^{\sigma},110$ à $0^{\sigma},144$, $0^{\sigma},153$, $0^{\sigma},171$, par l'introduction de 10, 20 et 40 morceaux de fils de fer.

7° La durée des oscillations isochrones paraît donc ne dépendre que de la bobine induite elle-même. Elle a été de $0^{\sigma},076$ pour une bobine formée d'un fil de cuivre de 2500 mètres de long et $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre; et de $0^{\sigma},023$ pour une seconde bobine formée d'un fil de cuivre de 1200 mètres de long et $\frac{2}{5}$ de millimètre de diamètre. Il est remarquable que ces durées sont entre elles comme les quotients de la longueur des fils par leur diamètre. Ce quotient serait ainsi une espèce de résistance à un flux électrique parcourant les surfaces, et dans laquelle le périmètre remplacerait la section de la résistance ordinaire de Ohm.

8° Lorsque la bobine induite est formée d'une seule partie, de sorte que l'une des extrémités du fil se trouve à l'intérieur de la masse enroulée et l'autre à l'extérieur, la première reste pendant toute la durée du phénomène à un potentiel à peu près nul; la différence mesurée représente ainsi tout entière le potentiel du pôle extérieur. Si la bobine est formée de deux bobines semblables, reliées soit par leur extrémité intérieure, soit par leur extrémité extérieure, les deux pôles libres ont à chaque instant des potentiels égaux et de signes contraires.

9° L'appareil d'induction restant le même, si l'on change l'intensité du courant inducteur, les valeurs du premier maximum, le seul dont je me sois occupé dans ce cas, croissent plus vite que proportionnellement aux intensités du courant inducteur; mais, si l'on considère les valeurs des intégrales $\int_0 E dt$, où E désigne la différence de potentiel

fonction du temps et θ le temps compris entre le début et le premier zéro, ou, ce qui revient au même, les aires de la première boucle de la courbe générale, ces valeurs sont exactement proportionnelles aux intensités du courant inducteur.

10° L'intensité du courant inducteur restant la même, les valeurs du premier maximum croissent plus vite que proportionnellement aux nombres de couches de spires composant la bobine inductrice; mais

les aires $\int_0^\theta E dt$ leur sont encore proportionnelles.

11° L'introduction de quelques morceaux de fils de fer dans la bobine inductrice augmente dans une énorme proportion la valeur du

premier maximum, et surtout celle de l'intégrale $\int_0^\theta E dt$.

12° Les maxima successifs vont en diminuant d'une manière relativement assez lente; il est probable que le nombre des oscillations est théoriquement infini, ce qui revient à dire qu'on en observera d'autant plus qu'on les produira plus intenses et qu'on emploiera des instruments de mesure plus sensibles. J'ai pu en compter plus de trente au début de ces expériences. J'ai déterminé avec soin, point par point, dans des circonstances bien spécifiées, les six premières boucles de la courbe générale.