

TRAITÉ EXPÉRIMENTAL
D'ÉLECTRICITÉ
ET DE MAGNÉTISME

II

PARIS. — IMPRIMERIE ÉMILE MARTINET, RUE MIGNON, 2.

TRAITÉ EXPÉRIMENTAL
D'ÉLECTRICITÉ
ET DE MAGNÉTISME

PAR

J. E. H. GORDON

Secrétaire-adjoint de « The British Association »

TRADUIT DE L'ANGLAIS ET ANNOTÉ

Par **M. J. RAYNAUD**

Docteur ès sciences, Professeur à l'École supérieure de télégraphie

AVEC LE CONCOURS DE M. SELIGMANN-LUI
Ingénieur des télégraphes

PRÉCÉDÉ D'UNE INTRODUCTION

Par **M. A. CORNU**

Membre de l'Institut (Académie des sciences),
Professeur de physique à l'École polytechnique

TOME SECOND

AVEC 31 PLANCHES ET 194 FIGURES

PARIS

LIBRAIRIE J. B. BAILLIÈRE ET FILS

19, RUE HAUTEFEUILLE, 19

1881

TRAITÉ EXPÉRIMENTAL
D'ÉLECTRICITÉ ET DE MAGNÉTISME

TROISIÈME PARTIE

ÉLECTRICITÉ VOLTAÏQUE ET ÉLECTRO-MAGNÉTISME
OU
ÉLECTRO-DYNAMIQUE
(Suite.)

CHAPITRE XXIX

COURANTS D'INDUCTION PRODUITS PAR LA FERMETURE
ET LA RUPTURE DU CIRCUIT

MOUVEMENT RELATIF

Les expériences décrites, vol. I, p. 581 à 584, nous ont montré que si on déplace un fil conducteur dans le voisinage d'un aimant, il se produit une certaine différence de potentiel aux extrémités de ce fil.

Nous savons que le même effet se produit si on laisse le fil stationnaire et qu'on déplace l'aimant, car le mouvement relatif est le même dans les deux cas.

Au lieu d'un aimant de forme ordinaire, on peut consi-
GORDON. Électricité. II. — 1

dérer une couche magnétique; et finalement, on peut remplacer la couche magnétique par son courant équivalent, comme dans la figure 171, p. 651, et dans la figure 154, p. 583.

Nous avons montré encore que le potentiel développé en un point par un circuit est égal à l'angle solide, d'où le circuit est vu de ce point, multiplié par l'intensité du courant; en sorte que si l'on fait varier *soit* l'angle solide, *soit* l'intensité du courant, on fait varier le potentiel.

Nous savons que lorsqu'on déplace le fil, on produit dans un fil voisin une force électro-motrice qui dure aussi longtemps que continue le mouvement; et de même, que si on fait varier le courant, on produit une force électro-motrice qui dure tant que la variation continue.

VARIATION DU COURANT

Un accroissement du courant a le même effet que si on approchait le fil; une diminution du courant a le même effet que si on éloignait le fil.

ACCROISSEMENT GRADUEL

Lorsque les extrémités du fil sont reliées à une pile, le courant qui passe à travers le fil n'atteint pas tout de suite sa valeur maxima, il augmente graduellement pendant un temps très court (une petite fraction de seconde). De même, quand on interrompt le courant, sa diminution est quelque peu graduelle.

Il y aura dans les deux cas courant induit dans un fil voisin, courant qui aura des directions opposées suivant qu'il s'agit de l'établissement ou de la rupture du contact, et dont la durée sera presque instantanée. La direction du courant induit de fermeture est la même que si le courant

inducteur; circulant constamment dans la même direction, avait été rapproché du fil induit, c'est-à-dire en sens inverse du courant primaire.

Nous voyons que l'intensité du courant induit dépendra du taux de la variation du potentiel dans le fil secondaire, puisqu'elle est proportionnelle au taux de la variation soit de l'angle solide, soit de l'intensité du courant inducteur.

EXTRA-COURANT

Si on envoie un courant dans une *bobine* de fil, on observe qu'à la fermeture du circuit le courant n'atteint pas instantanément sa valeur maxima, et qu'à la rupture il ne tombe pas instantanément à zéro. Cet effet est le même que celui qu'on obtiendrait si, au moment de la fermeture, on envoyait dans le fil un courant instantané de sens contraire au courant primaire, et au moment de la rupture, un autre courant instantané de même sens que le courant primaire.

Le même effet se produirait aussi si les phénomènes de courant électrique étaient dus aux mouvements d'un fluide ayant de l'inertie, et, par conséquent, de la quantité de mouvement quand il est en mouvement. S'il en était ainsi, au moment de l'application de la force électro-motrice, le fluide commencerait par se mouvoir lentement en vertu de son inertie, et, au moment où la force électro-motrice cesse d'agir, sa vitesse acquise empêcherait la résistance d'arrêter aussitôt le mouvement.

De nombreuses expériences ont montré que la première de ces hypothèses est la vraie (1); ou, au moins, que la

(1) Le fait que l'intensité d'un courant ne change pas quand on replie un fil conducteur sur lui-même, semble prouver que l'électricité n'a pas d'inertie.

première hypothèse est l'explication vraie de la presque totalité de l'effet. Il y a toutefois un petit effet résiduel, au sujet duquel l'expérience n'a pas encore donné de réponse décisive.

Les courants instantanés dans une bobine sont produits par l'induction de chaque portion du courant sur les spires voisines, chaque portion exerçant son action sur ces spires comme si elles faisaient partie d'un autre circuit.

Ces courants instantanés sont appelés les *extra-courants* de fermeture et de rupture. Si la bobine est dévidée et son fils élongé (fig. 178), de façon qu'il n'y ait pas de parties voisines les unes des autres, sauf celles qui se trouvent à

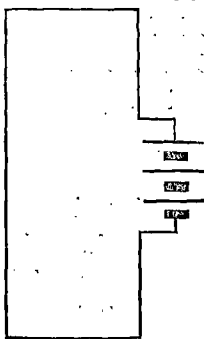


FIG. 178.

angles droits, l'extra-courant disparaît presque entièrement. Cela tient à ce que deux fils ne peuvent agir par induction l'un sur l'autre qu'autant qu'ils sont voisins et non dans des directions rectangulaires. Je dis que *presque* tout l'extra-courant disparaît [c'est-à-dire que le courant principal atteint son intensité maxima ou retombe à zéro *presque* aussitôt après la fermeture ou la rupture]; car il y a un léger effet résiduel pendant que le fil est dans cet

état que Faraday appelle l'état *électro-tonique*, c'est-à-dire l'état variable correspondant à la période de formation ou de cessation du courant.

MESURE DES COURANTS INDUITS PRODUITS PAR LA FERMETURE ET LA RUPTURE D'UN CIRCUIT

Sauf dans certains cas spéciaux, on ne mesure pas l'intensité du courant induit à un instant donné, à cause de sa

courte durée et de ses variations qui paraissent à peu près arbitraires, même pendant le peu de temps qu'il dure.

On évitera ces deux difficultés dans la mesure d'un courant induit si, au lieu de sa valeur à un instant donné, on mesure la somme de toutes les valeurs qu'il prend pendant le peu de temps qu'il dure.

C'est ce que l'on fait en employant un galvanomètre à aiguille un peu lourde, qui, lorsqu'il reçoit une impulsion brusque, commence à se mouvoir très lentement. A chaque valeur que prend le courant induit, il donne à l'aiguille une impulsion proportionnelle, et la dernière impulsion est reçue par l'aiguille avant que la première l'ait déplacée sensiblement de sa position de repos (1).

Les impulsions, s'ajoutant les unes aux autres, font osciller l'aiguille à partir de sa position de repos. La limite extrême de l'oscillation ou l'élongation est une mesure de la somme des impulsions, c'est-à-dire du courant total produit par la fermeture ou la rupture d'un circuit voisin (2).

EXPÉRIENCES DE BLASERNA

Le professeur Blaserna (3) a étudié les lois des courants d'ouverture et de fermeture, ainsi que la durée des cou-

(1) On emploie pour les expériences de cette nature le galvanomètre balistique (vol. I, p. 496).

(2) Si i est l'intensité du courant induit, à un instant quelconque, le courant total est

$$\int_0^t i \, dt,$$

où t est un temps qui n'est pas inférieur à celui que le courant primaire met à varier de 0 à son maximum à la fermeture, ou de son maximum à 0 à l'ouverture du circuit.

(3) Professor Pietro Blaserna. *Sullo sviluppo e la durata delle correnti d'induzione, e della estracorrenti*, *Giornale di Scienze Naturali ed Economiche*. Vol. VI, Palermo, 1870.

rants produits à l'ouverture et à la fermeture, tant dans le fil lui-même que dans les fils voisins.

Sa manière de procéder est la suivante : Pour mesurer la durée d'un courant dans le fil secondaire, il est nécessaire de couper la communication de ce fil avec le galvanomètre, à un intervalle de temps connu et très court après la fermeture ou l'ouverture du circuit primaire. On cherche la plus petite valeur que puisse avoir cet intervalle sans affecter la grandeur du courant secondaire : cette valeur est la durée de ce courant secondaire.

L'INTERRUPTEUR DIFFÉRENTIEL

Le professeur Blaserna fait cette mesure au moyen de deux cylindres CC' (fig. 179), calés sur un arbre commun,

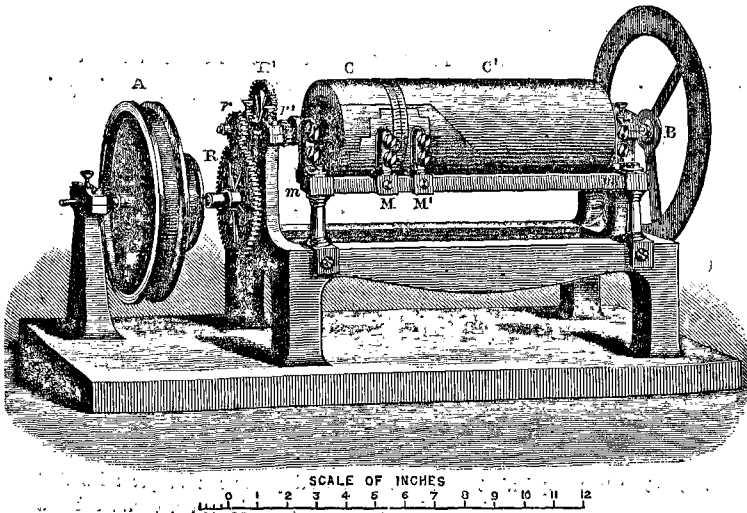


FIG. 179. (Échelle en pouces.)

et dont la surface est partie en bois, partie en métal. Deux

ressorts métalliques appuient sur les deux cylindres, un sur chaque ; ils ferment et ouvrent respectivement les circuits primaire et secondaire, selon qu'ils appuient sur le métal ou le bois dans chaque cas. En faisant tourner rapidement les cylindres, à une vitesse connue, on peut obtenir à volonté une durée quelconque de contact, si courte qu'elle soit.

La figure 179 donne les détails de l'appareil que l'inventeur appelle l' « interrupteur différentiel ».

La figure 180 est un diagramme du même appareil.

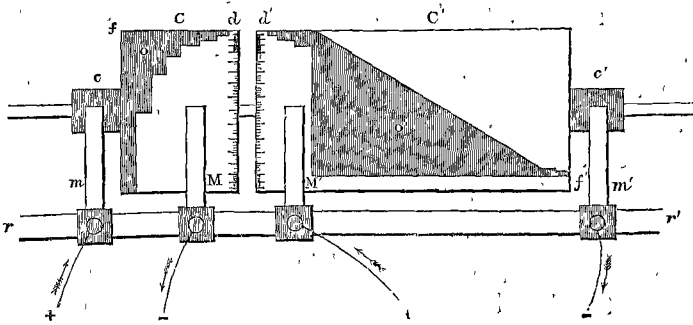


FIG. 180

Autour de la poulie A passe une courroie montée sur un volant pesant qu'un aide fait tourner à bras. Au moyen du train d'engrenage Rr, Rr', un mouvement très rapide est transmis au cylindre. MM' sont les ressorts de contact que l'on peut déplacer longitudinalement et fixer dans une position quelconque. Les cylindres peuvent être mis dans une position quelconque l'un par rapport à l'autre, et cette position relative est connue par les cercles divisés dd'. Les ressorts mm' qui appuient sur les tourillons cc' complètent le circuit.

La partie métallique de la surface du cylindre est découpée en gradins sur le cylindre primaire; partie en gradins, partie suivant une ligne oblique sur le cylindre secondaire.

En plaçant convenablement les ressorts MM' , nous pouvons produire la fermeture ou l'ouverture du circuit secondaire au moment où le cylindre aura tourné d'un angle choisi à volonté, après la fermeture ou l'ouverture du circuit primaire.

MESURE DE LA VITESSE DE ROTATION

Une roue B est fixée à l'axe du cylindre, et tourne avec lui. Sur sa circonférence se trouvent plusieurs couronnes de trous, les trous étant équidistants sur chaque couronne. Les couronnes comprennent respectivement 96, 48 et 24 trous.

Un jet d'air, sortant d'un tube de caoutchouc, frappe sur la roue, et, alternativement, est intercepté ou passe librement, suivant qu'une partie pleine ou un trou se présente devant la bouche du jet. Quand ces ouvertures et fermetures se succèdent rapidement, une note musicale se produit.

Or on connaît le nombre de vibrations par seconde d'un diapason ou autre instrument produisant une note. Si donc la note produite par le jet d'air est la même que celle que produit un diapason donnant n vibrations par seconde, nous saurons que n trous ont passé devant le jet pendant une seconde; et, par suite, que le nombre de tours par seconde est de

$$\frac{n}{96}, \quad \frac{n}{48} \quad \text{ou} \quad \frac{n}{24},$$

suivant la couronne de trous dont on se sert.

Un observateur dont l'oreille est suffisamment exercée peut déterminer la vitesse par ce moyen mieux que par tout autre.

Supposons maintenant que le cylindre tourne avec une vitesse de N tours par seconde, et que, entre la fermeture du courant primaire et l'ouverture du courant secondaire, par exemple, le cylindre ait tourné de θ degrés : alors, le temps qui s'écoule entre la fermeture du circuit primaire et l'ouverture du circuit secondaire sera

$$\frac{\theta}{360} \cdot \frac{1}{N} \text{ de seconde;}$$

ce qui donnera, si, par exemple, nous nous servons de la couronne de trous extérieure :

$$\frac{\theta}{360} \cdot \frac{96}{n} = \frac{4}{15} \cdot \frac{\theta}{n} \text{ de seconde,}$$

où n est le nombre de vibrations par seconde de la note que rend la roue perforée.

EXPÉRIENCES PRÉLIMINAIRES

Le professeur Blaserna décrit d'abord un certain nombre d'expériences préliminaires, destinées à montrer que l'on peut se fier à l'instrument pour établir le contact exactement au moment où le bord du métal arrive sous le ressort, et non une fraction de seconde plus tard. Ce point établi d'une manière satisfaisante, il procède aux expériences qui constituent le véritable sujet de ses recherches.

La salle dans laquelle se faisaient les expériences avait environ 5,40 mètres de côté. L'« interrupteur différentiel » était boulonné à un massif de pierre fixé à l'une des murailles ; le galvanomètre était posé sur un massif semblable

sur le côté opposé de la salle, et par suite n'était pas affecté par les vibrations de la machinerie.

Un des galvanomètres était une boussole des tangentes pourvue d'un miroir. L'auteur indique une méthode pour la graduer, c'est-à-dire pour éliminer ses erreurs et déterminer exactement l'intensité de courant qui correspond à chaque déviation. On employait aussi dans les observations un galvanomètre astatique.

Les premières expériences furent faites sur le

COURANT INDUIT DE FERMETURE

La disposition était celle de la figure 181. Le circuit primaire était fermé pendant 180° , et le circuit secondaire était

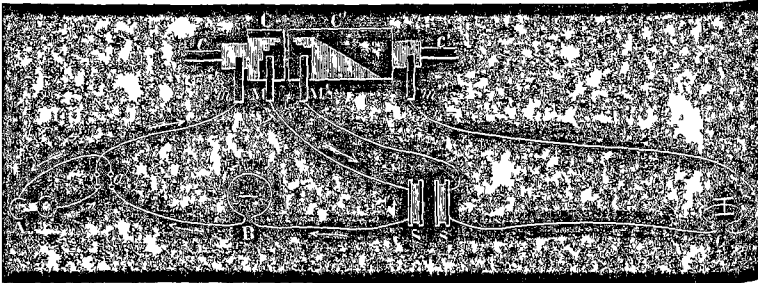


FIG. 181.

coupé, quand le cylindre avait tourné de $10,9$ après la fermeture du circuit primaire.

On a trouvé que, le circuit primaire étant fermé et traversé par un courant qui donnait une déviation de 25° à la boussole de tangentes B, l'impulsion due à la fermeture déviait de $3^\circ \frac{1}{2}$ le second galvanomètre G. Les bobines SS' étaient distantes de 1 centimètre l'une de l'autre. Lorsqu'on tournait doucement la roue, de façon à donner au

cylindre une vitesse de 3,76 révolutions par seconde, la déviation au galvanomètre d'induction montait de suite à 36°, ce qui montre que les effets des impulsions se succédant rapidement s'ajoutaient sur l'aiguille.

La vitesse croissant, la déviation augmentait jusqu'à ce qu'elle fût de 42° pour 9,07 révolutions. C'était son maximum : au delà elle commençait à décroître, le circuit secondaire étant rompu avant que le courant induit s'y fût complètement formé.

On a obtenu les déviations suivantes :

Nombre de tours par seconde.	Déviation.
10,10.....	38,34
12,23.....	7
16,66.....	1
19,05.....	0,5
19,90 et au delà.....	0

C'est-à-dire que, pour une vitesse supérieure à 19,9 tours par seconde, le circuit était rompu avant que le courant d'induction eût commencé à se former. De ces expériences nous tirons la conclusion suivante :

« *Le courant induit ne se forme pas subitement à l'instant de la fermeture, mais quelque temps après. Il arrive rapidement à son maximum, et décroît ensuite plus lentement.* »

Le professeur Blaserna constate que la forme de la courbe qui exprime la relation entre la vitesse de rotation et l'intensité du courant induit varie, non seulement avec l'écartement des bobines, mais aussi avec la capacité inductive spécifique, (1) de la substance que l'on introduit entre elles.

(1) Plus probablement, avec la capacité inductive magnétique. Des expériences avec la balance d'induction de Hughes (vol. I, ch. XXIV) pourraient éclaircir ce point.

Le temps t , qui s'écoule entre la fermeture du courant primaire et le commencement de la formation du courant induit, dépend de la distance des bobines et de la substance qui les sépare.

Voici quelques-uns des résultats de Blaserna :

Distance des bobines:		
1 centimètre d'air.....		0,000 167 secondes.
2,3 —		0,000 208 —
2,3 avec un disque de gomme laque.....		0,000 380 —
4 — d'air		0,000 290 —
1 centimètre, avec un grand disque de gomme laque		0,000 450 —
1 centimètre, avec 4 couches de verre, chacune de l'épaisseur du disque de gomme laque..		0,000 373 —
1 centimètre, avec un disque de soufre.....		0,000 402 —
1 centimètre, avec un disque de poix-résine (1).		0,000 585 (?) —

De ces expériences et d'autres semblables, il déduit la distance qui aurait dû exister entre les bobines pour que le courant induit commençât une seconde après la fermeture du circuit primaire, l'intervalle des bobines étant rempli des différentes substances.

Nous avons pour :

L'air.....	270 mètres.
Le verre	61 —
La gomme-laque	57 —
Id. (grand disque).....	44 —
Le soufre	52 —
La poix-résine	30 (?) —

Il appelle ces distances le « retard » produit par les différentes substances.

(1) Pece greca.

FIN DU COURANT INDUIT

Pour cette partie des recherches, la méthode adoptée consistait à disposer les cylindres de façon que le circuit secondaire fût fermé environ 3° après le courant primaire. Si le phénomène ne se compliquait pas d'actions perturbatrices, la durée du courant induit, ou plutôt l'intervalle compris entre la fermeture du courant primaire et la fin du courant induit, serait le temps nécessaire au cylindre pour tourner de 3°, avec la plus grande vitesse pour laquelle il n'y a pas de déviation au galvanomètre.

Mais le phénomène se complique de deux choses : la réaction du courant secondaire sur le circuit primaire, et le doute où l'on est si le courant induit cesse au moment de la rupture du circuit, ou s'il dure quelque temps encore dans le fil.

Blaserna n'a pas réussi à corriger complètement ces deux erreurs, mais il indique comme résultat approché que la durée du courant de fermeture varie de 0,001624 à 0,001960 de seconde. Il dit d'ailleurs qu'il n'attache pas grande valeur à ces résultats, et croit possible l'existence de plusieurs maxima et minima.

COURANT INDUIT DE RUPTURE

Pour ces expériences, le cylindre est disposé de manière à fermer le circuit secondaire au moment même de la rupture du circuit primaire, ou, par surcroît de précaution, un instant auparavant.

On a trouvé que :

Le courant de rupture se forme et se complète dans un temps plus court que le courant de fermeture.

On donne les résultats comparatifs suivants :

Temps nécessaire pour atteindre le maximum dans les mêmes conditions :

Courant de fermeture	0,000 485 secondes.
Courant de rupture.....	0,000 275 —

Maximum d'intensité :

Courant de fermeture.....	23 770 unités arbitraires.
Courant de rupture.....	86 000 —

Mais on doit se souvenir que l'« aire » des deux courants est la même, c'est-à-dire que l'intégrale par rapport au temps a la même valeur pour les deux (1).

Cela veut dire que la quantité totale d'électricité qui traverse le fil est la même dans les deux sens.

Alors si le courant de rupture est plus intense et de durée moindre que le courant de fermeture, la différence de potentiel dans le fil secondaire doit être plus grande dans le premier cas que dans le second.

Le professeur Blaserna trouve que le rapport des potentiels dans les deux cas est d'environ 13 à 6.

Or, MM. de la Rue et Müller (2) ont trouvé que la longueur de l'étincelle obtenue dans l'air avec des piles de 600 à 5640 éléments varie comme le carré du nombre des éléments; c'est-à-dire comme le carré de la différence de potentiel.

Supposons le courant induit assez fort pour donner des étincelles; d'après les résultats de Blaserna, nous aurons :

Rapport des longueurs des étincelles dues aux courants induits de rupture et de fermeture

$$= \frac{13^2}{6^2} = 4,69$$

(1) Voy. note 2, p. 5.

(2) Proc. Roy. Soc., 1876, vol. XXIV, p. 167

Mais, outre qu'il est plus intense, le courant de rupture se forme bien plus vite que celui de fermeture. L'effet de la correction qui a été appliquée aux nombres 860 et 237 pour obtenir le rapport $\frac{13}{8}$ me semble, autant que je puis comprendre le raisonnement du professeur Blaserna, avoir pour résultat de négliger entièrement ce fait que l'on sait avoir une grande importance pour la longueur de l'étincelle.

Prenant les nombres non corrigés, nous avons

$$\frac{860^2}{237^2} = \text{environ } 13.$$

Dans une bobine d'induction (1), l'étincelle de rupture est bien plus grande que celle de fermeture, bien plus de 13 fois plus grande.

Mais les deux cas sont à peine comparables, parce que dans la bobine d'induction les phénomènes se compliquent du temps nécessaire à l'aimantation et à la désaimantation du noyau de fer.

La valeur non corrigée de ce rapport, qui résulte simplement des élongations, est dans une certaine mesure analogue à la longueur d'étincelle; l'élongation ne dépendant pas seulement de la force, mais aussi de la soudaineté de l'impulsion.

EXTRA-COURANT DE FERMETURE

Pour l'étude de l'extra-courant, on employait une bobine S, reliée comme le montre la figure 182. On employait une courroie courte, et on ne tournait pas la roue trop rapidement : on put alors observer des oscillations dans le

(1) Voy. vol. II, ch. XXXIII.

courant qui montraient que l'extra-courant agit en sens inverse du courant primaire. Le premier résultat obtenu a été le suivant :

« *Le courant induit se forme en même temps que le courant primaire, et commence à circuler, quoique faiblement, au moment de la fermeture.* »

Des observations ultérieures ont montré qu'il y a plusieurs oscillations, c'est-à-dire qu'au lieu d'atteindre un

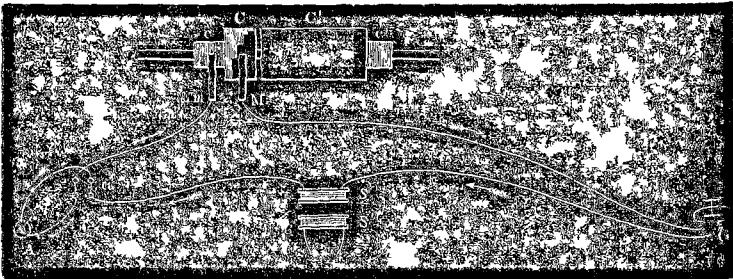


FIG. 182.

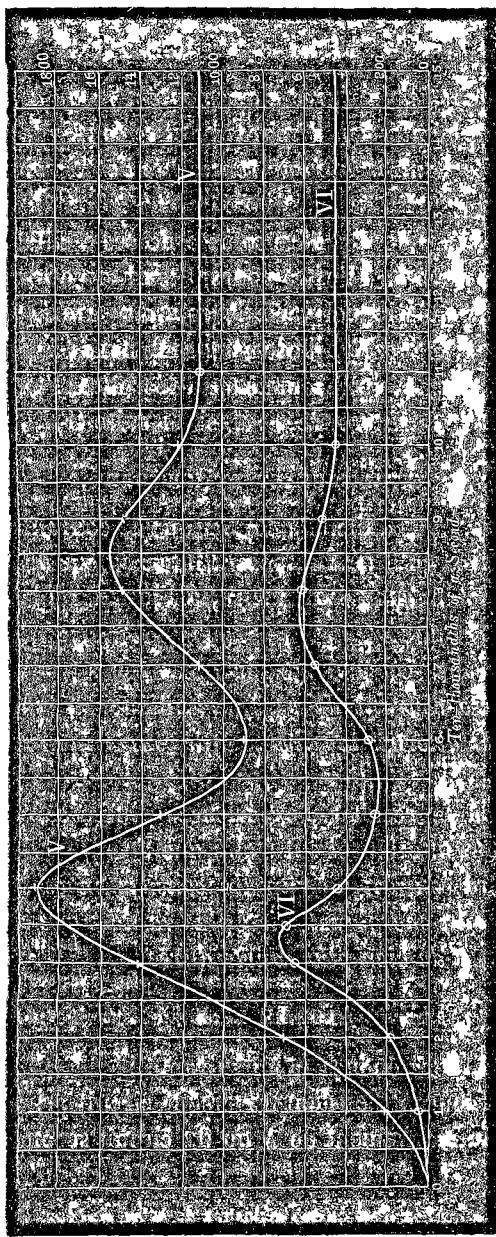
maximum et de diminuer ensuite, l'extra-courant passe par plusieurs maxima et minima.

Sur la planche XXVI, les courbes V et VI représentent les valeurs du courant primaire moins l'extra-courant; par suite, en prenant pour axe des abscisses la valeur de l'intensité normale, les mêmes courbes donnent les valeurs de l'extra-courant.

L'état variable de l'extra-courant peut durer jusqu'à $\frac{2}{100}$ de seconde.

L'étude des courbes montre que :

« *La première oscillation du courant a une grande amplitude et une courte durée; la seconde, moins d'amplitude et plus de durée; l'amplitude continue de décroître*



Pl. XXVI. — Oscillations de l'extra-courant. (Les abscisses représentent des dix-millièmes de seconde.)

régulièrement, et la durée d'augmenter, jusqu'à ce qu'à la fin, toute oscillation disparaisse et se confonde avec la ligne droite horizontale qui représente l'état normal du courant. »

Nous pouvons nous rendre compte de ces oscillations de la manière suivante : l'extra-courant tend toujours à changer le sens dans lequel varie le courant. Ainsi, pendant que le courant croît, l'extra-courant tend à le faire décroître; aussitôt qu'il commence à décroître, l'extra-courant tend à le faire croître, et ainsi de suite (1).

EXTRA-COURANT DE RUPTURE

Il est bien plus difficile à étudier que le courant de fermeture, parce qu'il faut disposer l'interrupteur de façon à relier la bobine au galvanomètre; à l'instant où le circuit de pile est rompu.

Ayant réalisé cet arrangement, Blaserna a trouvé que :

« L'extra-courant de rupture consiste en une série de courants alternés se suivant à de courts intervalles de temps. »

C'était là le résultat d'expériences préliminaires; des observations ultérieures ont établi que :

« L'extra-courant de rupture consiste en oscillations plus ou moins énergiques, bien plus rapides que celles de fermeture, et de bien plus courte durée. »

LOI DE LENZ

En 1834, Lenz énonça la loi suivante :

« Si un courant constant traverse le circuit primaire A, et si, par le mouvement de A ou du circuit secondaire B,

(1) Cette explication n'est qu'une déduction de la loi de Lenz.

un courant est induit dans B, la direction du courant induit est telle que, par son action électro-magnétique sur A, il tend à s'opposer au mouvement des circuits (1). »

Si à un courant qui s'éloigne ou s'approche d'un autre, nous substituons un courant dont l'intensité diminue ou augmente, nous voyons que les résultats de Blaserna, en particulier en ce qui concerne l'oscillation de l'extra-courant, peuvent s'expliquer comme conséquences de la loi de Lenz.

EXPÉRIENCES DE SCHILLER SUR LES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES (2)

En 1874, Schiller rendit compte de quelques expériences sur les « oscillations électriques ». Il trouva que si l'on interrompt subitement un courant électrique dans une bobine primaire R_1 qui agit par induction sur une bobine secondaire R_2 , dont les deux bouts sont isolés l'un de l'autre, il y a dans la bobine secondaire un grand nombre d'« oscillations » extrêmement rapides; c'est-à-dire que si l'un des bouts de la bobine secondaire est mis à la terre, l'autre passera par une succession rapide de potentiels (+) et (-).

La durée de chaque oscillation variait dans les diverses expériences, mais était généralement de 6 à 12 cent-millièmes de seconde.

Si les extrémités de la bobine secondaire sont reliées à un condensateur, la durée de chaque oscillation est augmentée.

Les oscillations se mesuraient par la méthode suivante :

(1) Maxwell, *Electricity*, 542, vol. II, p. 176.

(2) *Einige experimentelle Untersuchungen über electrische Schwingungen*, von N. Schiller (*Pogg. Ann.*, 1874, p. 535).

Une bobine primaire R_1 est reliée à un élément Daniel B et à une clef de contact P' .

R_1 est placé à l'intérieur d'une bobine secondaire R_2 , dont un bout est relié à la terre, et l'autre, à travers la clef P, au condensateur C et à une des paires de quadrants d'un électromètre. L'autre paire de quadrants et l'autre armature du condensateur sont reliées à la terre.

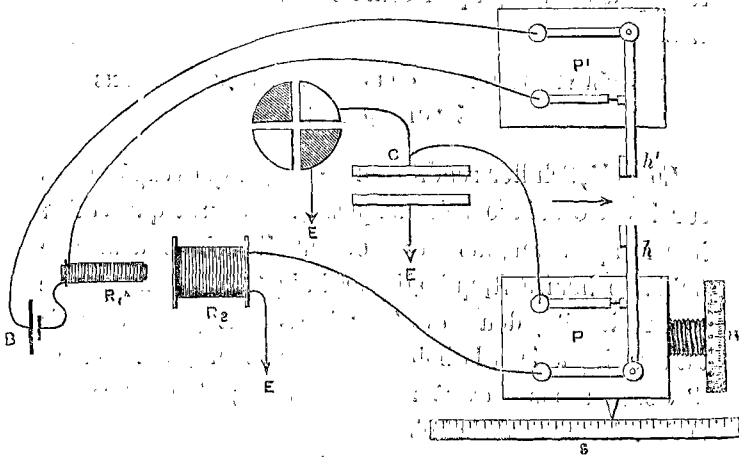


FIG. 183

Les clefs P et P' sont habituellement tenues fermées par des ressorts, mais sont disposées de façon que, quand on les a ouvertes, elles restent ouvertes.

Ces clefs sont ouvertes au moyen d'un lourd pendule, retenu dans la position horizontale par un électro-aimant, et qui, lorsqu'il est laissé libre, tombe dans la direction de la flèche, et frappe les leviers hh' .

Si h et h' étaient sur la même ligne-droite, les courants seraient rompus simultanément.

Mais la clef P peut être déplacée par la vis micromé-

trique M, de façon que le levier *h* ne soit frappé qu'un certain temps après le levier *h'*. L'échelle S montre le nombre de tours de la vis, et les fractions de tour se liseint sur la tête divisée M.

Quand on connaît la vitesse du mouvement du pendule, on peut déterminer l'intervalle de temps correspondant à une division de l'échelle (1).

Il était possible ainsi de rompre le contact dans la bobine secondaire à un intervalle de temps connu et très petit après celui de la bobine primaire.

Quand les oscillations électriques ont lieu, le potentiel devient alternativement (+) et (-).

La courbe d'oscillation présente le même aspect général que la partie de la courbe V (pl. XXVI) qui est comprise entre les verticales 2 et 11, la ligne horizontale 13 étant prise pour ligne du potentiel zéro.

Or, lorsque le potentiel passe du (+) au (-) ou du (-) au (+), il traverse la ligne zéro; par suite, au commencement et à la fin de chaque oscillation, le potentiel de l'électromètre dans le fil secondaire sera zéro.

Si le circuit secondaire est rompu au commencement d'une oscillation, il n'y aura pas de déviation de l'électromètre, car, au moment de la rupture le potentiel est zéro, et les sommes des charges positive et négative qui précèdent sont égales.

Dans les expériences, le circuit primaire était rompu le premier, et ensuite, après un intervalle convenable, le cir-

(1) La valeur en temps d'une division de l'échelle se déterminait en reliant les deux clés aux bobines d'un galvanomètre différentiel sensible. Quand les contacts sont rompus simultanément, il n'y a pas de déviation. Quand P a été déplacé d'une division de l'échelle, il y a une élévation de l'aiguille qui dépend du temps pendant lequel le courant de P a agi seul. Le temps se calcule d'après l'élévation.

cuit secondaire. L'intervalle était choisi de façon que les résultats ne fussent pas confondus par l'étincelle, et que d'autre part les oscillations ne fussent pas trop petites.

La vis micrométrique était alors réglée jusqu'à ce qu'il n'y eût plus de déviation à l'électromètre. La lecture faite, on amenait la clef P, au moyen de la vis, à la position la plus voisine où il n'y avait pas de déviation. La différence de la première et de la seconde lecture donnait la durée d'une oscillation en divisions de l'échelle. Le temps correspondant à une division de l'échelle était déterminé à part.

Pour l'instrument dont on s'est servi, il a été trouvé de 0,000 001 253 6 seconde.

Sans condensateur, la durée d'une oscillation a été trouvée de 33 divisions de l'échelle, ou de

0,000 041 369 seconde (quatre cent-millièmes de seconde).

L'auteur indique une correction pour l'effet d'« amortissement » causé par l'induction des fils les uns sur les autres, etc.

APPLICATION A LA CAPACITÉ INDUCTIVE SPÉCIFIQUE

On peut démontrer mathématiquement que la capacité d'une bobine est proportionnelle au carré de la durée d'oscillation quand on emploie la bobine seule; et celle d'une bobine et d'un condensateur à la fois, à la même quantité lorsqu'on fait usage en même temps de la bobine et du condensateur.

De ce fait on peut déduire le rapport des capacités de deux condensateurs.

Or, si nous avons deux condensateurs exactement semblables, contenant l'un de l'air, et l'autre un diélectrique

quelconque, le rapport de la capacité du second à celle du premier est la capacité inductive spécifique du condensateur.

Soient T_0 la durée d'oscillation avec la bobine seule;

T_1 la durée d'oscillation avec la bobine et le condensateur à diélectrique;

T_2 la durée d'oscillation avec la bobine et le même condensateur plein d'air, et le diélectrique enlevé.

Nous aurons pour la capacité inductive spécifique :

$$K = \frac{T_0^2 - T_2^2}{T_1^2 - T_2^2}.$$

On a fait par cette méthode une série de déterminations de capacité inductive spécifique dont les résultats sont donnés à la p. 162 du vol. I. Ils ont une importance particulière, car, étant donnée la rapidité des renversements de potentiels, il n'a pu y avoir de charge permanente, et les nombres obtenus doivent représenter ce que Wüllner (1) appelle les « capacités instantanées des diélectriques ».

RECHERCHES DE M. MOUTON SUR L'INDUCTION (2)

M. Mouton s'est proposé de mesurer les valeurs successives par lesquelles passe la différence de potentiel aux deux extrémités du fil d'une bobine induite quand ces fils sont complètement isolés, en se bornant au cas de la rupture du courant inducteur. Cette différence est nulle pendant le passage du courant inducteur, elle est encore nulle quelques instants après la rupture : elle part de zéro pour revenir à zéro, il s'agit de déterminer les valeurs intermédiaires.

(1) Vol. I, p. 167.

(2) *Journal de physique*, vol. VI, pp. 1 et 46, 1877.

L'appareil employé se compose essentiellement d'un *disjoncteur* et d'un électromètre à quadrants. Le disjoncteur permet de faire varier de quantités déterminées l'intervalle de temps qui s'écoule entre la rupture métallique du courant inducteur et l'établissement des contacts respectifs des extrémités du fil induit avec les électrodes de l'électromètre. Le mouvement de rotation est communiqué au disjoncteur par un moteur de Gramme et régularisé par un régulateur à force centrifuge. La vitesse est mesurée par le nombre de points compris dans une longueur donnée de la bande d'un récepteur Morse dont la marche de déroulement a été comparée à un chronomètre. De cette vitesse et de la distance, réglée par une vis micrométrique, qui sépare le contact de rupture des deux contacts simultanés reliant le fil induit à l'électromètre, on déduit l'intervalle de temps cherché. Enfin, dans l'appareil d'induction, la bobine inductrice pénètre exactement dans la bobine induite. Voici les principaux résultats de cette étude :

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

2° La différence de potentiel va en croissant, et, aucun phénomène d'étincelle ou de courant n'ayant pu se produire, cette différence, après avoir atteint un certain maximum, diminue, retombe à zéro, etc., c'est-à-dire oscille de part et d'autre du zéro.

3° Les temps qui séparent deux zéros consécutifs sont rigoureusement égaux, à l'exception du premier, toujours plus long.

4° Ces temps diffèrent avec les bobines induites employées ; mais pour une bobine induite donnée, ils paraissent indépendants du nombre de spires de la bobine inductrice et de l'intensité du courant inducteur.

5° 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 reprenant les valeurs précédentes.

6° Les expériences faites sur deux bobines induites semblent indiquer que les durées des oscillations isochrones, lesquelles ne dépendraient que de la bobine induite, seraient 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.

7° Si l'on change l'intensité du courant inducteur seule, les valeurs du premier maximum croissent plus vite que proportionnellement aux intensités du courant inducteur ; mais si l'on considère les valeurs des intégrales $\int_0^{\theta} E dt$, où E désigne la différence de potentiel fonction du temps et θ le temps compris entre le début et le premier zéro, c'est-à-dire les aires de la première boucle de la courbe, ces valeurs sont exactement proportionnelles aux intensités du courant inducteur.

8° L'intensité du courant inducteur restant la même, les intensités du premier maximum croissent plus vite que proportionnellement au nombre des couches de spires composant la bobine inductrice, mais les aires $\int_0^{\theta} E dt$ leur sont encore proportionnelles.

9° Les maximum semblent diminuer assez lentement pendant la période oscillatoire : les oscillations observées sont en nombre d'autant plus grand qu'on les produit plus intenses et que les instruments de mesure sont plus sensibles.

J. R.

NOTE SUR L'INDUCTION (1)

Les courants induits ne se produisent que lorsque le courant inducteur change ou d'intensité ou de position. Supposons le circuit inducteur immobile, et considérons les courants qu'il induit par les variations de son intensité.

Des variations se manifestent dans le courant inducteur quand il commence et quand il finit : c'est ce que l'on appelle l'état variable du courant. Quand le courant inducteur commence, il produit un courant induit inverse : courant de fermeture. Quand le courant inducteur finit, il produit un courant induit direct : courant d'ouverture. Les deux courants induits peuvent se développer ou dans un circuit voisin, ou dans le circuit inducteur lui-même : dans ce dernier cas, on les appelle des extra-courants.

On a reconnu tout d'abord que les deux courants induits, direct et inverse, sont égaux en quantité et inégaux en tension. En d'autres termes, ils produisent les mêmes effets sur les instruments qui servent à mesurer la quantité de courant (galvanomètres et voltamètres) ; mais le courant direct se montre supérieur au courant inverse quand le courant a de grandes résistances à vaincre, comme la résistance de

(1) Bortin, *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, vol. XXII, p. 486, 1871.

l'air (étincelle), celle du corps humain (commotion), ou la force coercitive de l'acier (aimantation) : c'est ce qu'on exprime en disant qu'il a plus de *tension*.

Il importe de bien distinguer les mots *intensité*, *quantité* et *tension*.

L'intensité est la quantité i d'électricité qui s'écoule par seconde, quantité constante si le courant est constant, en sorte que la quantité q qui passe dans le temps θ est $q = i\theta$.

Si le courant est variable, l'intensité l'est aussi : c'est à chaque instant la quantité d'électricité que le courant transporterait dans une seconde, s'il restait indéfiniment dans l'état où il se trouve à cet instant ; mais cet état, au lieu d'être constant, ne dure qu'un temps infiniment petit dt . i étant l'intensité au temps t , la quantité transportée dans le temps dt sera idt , et si la durée du courant est θ , la quantité totale sera :

$$q = \int_0^{\theta} idt.$$

En représentant les variations du courant par une courbe dont l'abscisse représente le temps et l'ordonnée l'intensité, la *quantité* est l'*aire* de cette courbe. Les courbes des deux courants induits ont la même aire, puisque les deux courants sont égaux en quantité ; mais les courbes ne sont pas identiques pour cela, et l'ordonnée maximum est bien plus grande pour le courant direct que pour le courant inverse. C'est cette intensité maximum qui caractérise la *tension*, et c'est ce qui explique les effets du courant direct dans le cas de grandes résistances à surmonter.

On peut classer en trois groupes les effets des courants d'induction :

1° Ceux qui sont proportionnels à la quantité $\int idt$ et qui sont les mêmes pour les deux courants, direct et inverse : ce sont les effets *galvanométriques* et *chimiques* ;

2° Ceux qui sont proportionnels au carré de l'intensité $\int i^2 dt$: ce sont les effets *calorifiques* et *électro-dynamiques* (voy. chap. XXX et XLII) ;

3° Ceux que l'on appelle *effets de tension* et qui paraissent dépendre surtout du maximum de l'intensité : ce sont les effets *physiologiques*, *lumineux* et d'*aimantation*.

Les intégrales $\int idt$ et $\int i^2 dt$ doivent être étendues à toute la durée des courants induits : or cette durée peut être théoriquement

infinie; car, quand un courant s'établit dans un conducteur, il produit un extra-courant inverse qui le diminue; il ne peut donc pas s'accroître sans diminuer, et l'état permanent ne s'établit qu'après un temps infini: par suite, le courant induit qu'il produit pendant toute la durée de son état variable aura aussi une durée infinie. Mais comme le courant inducteur arrive en très peu de temps à un état très voisin de son état permanent, en sorte que la différence n'est plus appréciable à nos instruments, le courant induit n'est plus sensible que pendant un temps très court, et sa durée mesurable est très petite. C'est ce que l'on exprime en disant que les courants induits sont instantanés. Ainsi la courbe d'intensité s'étend à l'infini, mais son ordonnée devient inappréciable au bout d'un temps très court, et c'est l'aire de la courbe, depuis son origine jusqu'à cette ordonnée, qui représente la quantité mesurable du courant. Cette aire est la même pour les deux courants, direct et inverse; mais comme le premier a une tension ou une ordonnée maximum plus grande que le second, il faut nécessairement, pour l'égalité des aires, que la base de la courbe soit plus petite, c'est-à-dire que le courant direct ait une durée moindre que l'inverse: si la tension est plus grande, la durée est plus petite et réciproquement.

Pour se rendre un compte sérieux des propriétés des courants induits, il faut tracer leurs courbes, et pour cela il faut pouvoir déterminer expérimentalement l'abscisse et l'ordonnée, c'est-à-dire le temps et l'intensité. Le temps se détermine par des méthodes chronométriques variées; mais la mesure d'une intensité variable n'est pas abordable par l'expérience; on ne peut mesurer que la quantité du courant, c'est-à-dire l'aire de la courbe, et il faut alors en déduire par le calcul l'ordonnée de la courbe ou l'intensité.

Quant à la quantité des courants instantanés, on a vu (ch. XIX, p. 510) qu'elle se mesure expérimentalement, à l'aide du galvanomètre, par deux procédés: 1° en mesurant l'arc d'impulsion α produit par l'envoi du courant instantané, ce qui fait connaître $\int_0^t idt$; 2° en envoyant dans le galvanomètre une série de courants de même sens à des intervalles assez rapprochés pour que l'aiguille prenne une déviation constante, laquelle fait connaître $n \int_0^t idt$, n étant le nombre de courants envoyés par seconde.

J. R.

CHAPITRE XXX

DES BOBINES ÉTALONS (1)

Dans toutes les mesures absolues, il est indispensable de connaître ce que l'on appelle les « constantes » des instruments.

Quand on mesure des courants par les galvanomètres, il est nécessaire de connaître le nombre des tours, ainsi que les dimensions et la position de chaque tour. Pour pouvoir compter exactement le nombre des tours et le mesurer directement, et afin que de petites erreurs dans la mesure n'introduisent pas une grande erreur relative, il faut que la bobine ait de grandes dimensions et ne contienne qu'un petit nombre de couches de fil.

Dans la construction d'un galvanomètre sensible, il est nécessaire de disposer les tours de fil de façon à exercer le plus grand effet possible sur l'aiguille ; par conséquent, les tours de fil doivent être aussi rapprochés que possible de l'aiguille, et il doit y en avoir un grand nombre.

En d'autres termes, la bobine doit être de petites dimensions, et avoir un grand nombre de tours de fil très serrés les uns contre les autres.

Ainsi les conditions à remplir dans la construction d'un galvanomètre étalon sont tout à fait différentes de celles à remplir dans la construction d'un galvanomètre sensible. Le professeur Maxwell dit à ce sujet (2) :

(1) *Electricity*, de Maxwell, vol. II, chap. xv, p. 312.

(2) *Electricity*, de Maxwell, § 707, vol. II, p. 312.

« En construisant un galvanomètre sensible, on cherche à rendre aussi intense que possible le champ de force électro-magnétique dans lequel l'aiguille est suspendue. En construisant un galvanomètre étalon, on se propose de rendre aussi uniforme que possible le champ magnétique dans le voisinage de l'aimant, et de connaître exactement son intensité en fonction de l'intensité du courant. »

En raison de cette différence, les constantes des galvanomètres sensibles ne sont pas déterminées par mesure directe, mais par comparaison électrique avec de grandes bobines étalons.

Pour déterminer les valeurs des déviations d'un galvanomètre sensible, on procède comme il suit :

On le place concentriquement avec une bobine étalon, et de telle sorte que ses tours de fil soient parallèles aux tours de fil de l'étalon. Le galvanomètre entrera toujours dans l'étalon, qui a de grandes dimensions. On fait coïncider le plan des tours de fil avec le méridien magnétique. Des courants, dont on connaît le rapport des intensités, sont ensuite envoyés dans des directions opposées, l'un à travers le galvanomètre et l'autre à travers la bobine étalon. Supposons les directions des courants telles que le courant qui passe dans le galvanomètre tende à dévier l'aiguille, et que celui qui passe dans la bobine tende à la ramener au zéro.

Appelons θ la déviation ;

C le courant qui passe dans la bobine étalon ;

c le courant qui passe dans le galvanomètre sensible ;

H la valeur de la composante horizontale de la force terrestre au temps et au lieu de l'expérience ;

$2m$ le moment magnétique de l'aiguille.

Appelons aussi r le couple qu'exerce la bobine traversée par l'unité de courant sur une aiguille d'un moment égal à l'unité. Alors, si on expérimente avec la grande bobine seulement et si on éloigne le galvanomètre sensible, r sera le nombre par lequel le produit $H \tan \delta$ doit être divisé afin d'obtenir l'intensité vraie du courant; et comme le cercle est très grand, ce nombre sera égal à $\frac{2\pi}{a}$ fois le nombre de tours.

Soit γ la quantité correspondante pour le galvanomètre sensible. Cette quantité ne sera généralement pas proportionnelle au nombre de tours, et a ne peut pas être mesuré directement.

Replaçons le galvanomètre sensible. Les couples agissant sur une moitié de l'aiguille sont alors :

Couple tendant à la dévier tant que la déviation est très petite : $c\gamma \cos \delta \cdot lm$.

Couples tendant à la ramener au zéro : $Cr \cos \delta \cdot lm$ et $H \sin \delta \cdot lm$.

Lorsque l'aiguille est en équilibre, on a

$$Cr \cos \delta + H \sin \delta - c\gamma \cos \delta = 0,$$

ou, divisant par $\cos \delta$,

$$Cr - c\gamma = H \tan \delta.$$

Si on fait varier le rapport $\frac{C}{c}$ jusqu'à ce que $\delta = 0$, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'aiguille revienne au zéro, on a :

$$\gamma = \frac{C}{c} r.$$

On obtient le rapport de C à c sans connaître ni C ni c , en divisant le même courant entre les deux circuits, et en

interposant des résistances R et r respectivement dans C et c . Alors, si G est la résistance de la bobine étalon et g celle du petit galvanomètre, on a :

$$\frac{C}{c} = \frac{r + g}{R + G},$$

et par conséquent on connaîtra γ .

Pour plus amples renseignements au sujet de la comparaison des bobines, le lecteur est renvoyé au *Traité d'électricité* de Maxwell (vol. II, ch. xvii).

ÉLECTRO-DYNAMOMÈTRE

Le grand électro-dynamomètre de l'Association Britannique (pl. XXVII) peut être pris comme spécimen de bobine étalon. Il est actuellement déposé au laboratoire Cavendish, à Cambridge.

Il se compose de deux bobines placées parallèlement à $\frac{1}{2}$ mètre de distance l'une de l'autre. Leur rayon moyen est de $\frac{1}{4}$ mètre, et chacune d'elles contient 15 couches, chaque couche comprenant 15 tours de fil isolé et enroulé sur une gorge rectangulaire.

Dans cette bobine, on peut, à volonté, suspendre en A une autre bobine (fig. 184 et 185), quand on en a besoin pour étudier l'action mutuelle de deux courants ; ou bien on peut enlever la bobine suspendue et placer à l'intérieur de la bobine fixe un galvanomètre ou une hélice que l'on veut comparer à cette bobine fixe.

La figure 186 représente la suspension bifilaire.

« L'égalité de tension des fils de suspension est assurée en les attachant aux extrémités d'un fil de soie qui passe sur une roue, et leur distance est réglée par deux poulies-guides placées elles-mêmes à la distance convenable. On

peut donner à la bobine suspendue un mouvement vertical au moyen d'une vis agissant sur la roue de suspension, et

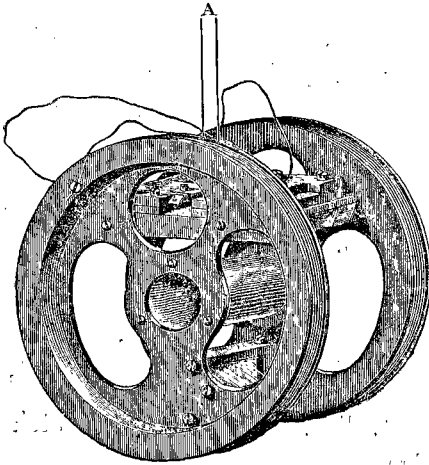


FIG. 184. — Élévation.

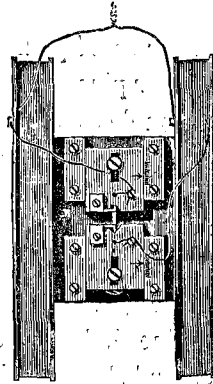


FIG. 185. — Plan.

un mouvement horizontal dans les deux sens à l'aide de deux pièces à coulisse que montre la figure 186. Son réglage en azimuth s'obtient au moyen d'une vis de torsion qui fait tourner la tête de torsion autour d'un axe vertical. On détermine l'azimuth de la bobine suspendue en observant la réflexion d'une échelle sur le miroir que l'on voit (fig. 184) juste sous l'axe de la bobine suspendue (1). »

Dans la figure 185, on ne voit pas les fils de suspension. Ils passent à travers des rainures en forme de V, dans l'intérieur desquelles ils sont retenus par des petits ressorts à crochet. Leur distance mutuelle peut être amenée au nombre entier de millimètres voulu, au moyen de graduations et de flèches.

(1) *Electricity*, de Maxwell, vol. II, p. 331.

La distance qui sépare les bouts supérieurs des fils de suspension peut être exactement réglée à l'aide de verniers

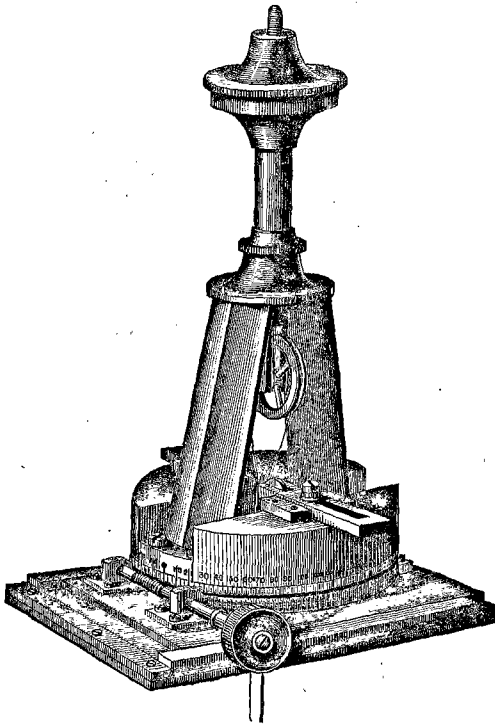
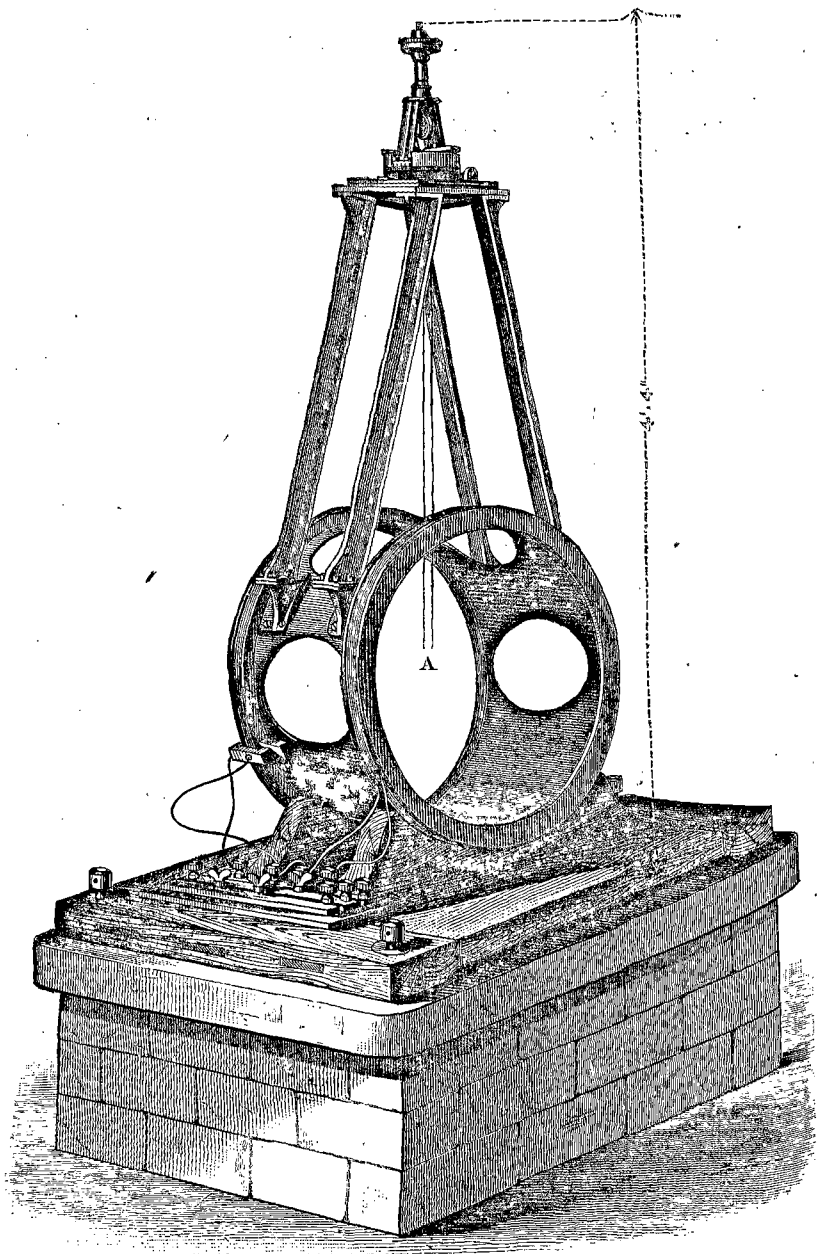


FIG. 186.

(non figurés) gravés sur les coulisses qui supportent les poulies-guides de la figure 186.

La torsion de la suspension bifilaire dépend du produit des distances des fils au haut et au bas de la suspension ; et, par suite, pour régler cette torsion, il suffit d'ajuster une de ces distances.



PL. XXVII. -- Électro-dynamomètre de l'Association Britannique. (' pieds, " pouces.)

APPENDICE AU CHAPITRE XXX

I

DÉTERMINATION DES CONSTANTES D'UNE HÉLICE

NOMBRE DE TOURS

Dans les expériences sur les effets magnétiques des courants, il est quelquefois nécessaire d'employer une grande hélice de fil afin d'obtenir un plus grand effet.

L'action d'une hélice sur une tige de fer qui la traverse dépend du nombre de tours et de l'intensité du courant.

Pour calculer les effets d'un courant, on a besoin de connaître le nombre de tours.

Comme on ne peut compter le nombre de tours d'une hélice contenant plus d'une couche qu'au moment de l'enroulement du fil, il est important d'avoir le moyen de le déterminer électriquement, afin d'éviter la dépense d'une hélice enroulée spécialement pour l'expérience que l'on a en vue.

On peut y arriver en comparant l'hélice avec un grand dynamomètre dont le nombre de tours est connu.

SPÉCIMEN D'EXPÉRIENCES

Les détails qui suivent sont ceux d'une détermination, faite par l'auteur (1) en 1877, du nombre de tours d'une des hélices de l'électro-aimant représenté dans la figure 191, chap. XXXI.

DÉTERMINATION DU NOMBRE DE TOURS

Il s'agit d'abord de déterminer la différence de potentiel magnétique aux deux extrémités d'une hélice, quand elle est traversée par

(1) *Phil. Trans.*, 1877, p. 4.

l'unité de courant. Cette quantité, que nous appelons N , est une fonction du nombre de tours et de leur arrangement; car, si nous connaissons pour chaque point de l'axe d'une hélice l'intensité magnétique due à l'unité de courant, c'est-à-dire la valeur de la force exercée par l'unité de courant dans l'hélice sur l'unité de pôle magnétique en ce point, nous connaissons aussi la quantité de travail qu'il faudrait développer pour faire mouvoir cette unité de pôle d'un bout de l'axe de l'hélice à l'autre bout, quand l'unité de courant passe dans l'hélice.

a et b étant les extrémités de l'hélice, u_x la force en un point de l'axe, la somme de travail en question serait égale à

$$\int_a^b u_x dx = V_b - V_a$$

V étant le potentiel en un point.

Mais les dimensions du potentiel magnétique, dans le système électro-magnétique, sont :

$$\left[L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \right];$$

et ce sont aussi les dimensions de l'intensité d'un courant électrique. Il en résulte que N , qui est le rapport de la première de ces deux quantités à la seconde, est un nombre.

La valeur de N pour l'hélice a été déterminée dans le laboratoire Cavendish, à Cambridge, par comparaison avec le grand dynamomètre de l'Association Britannique (pl. XXVII).

Les intensités de l'action magnétique étaient comparées en 7 points équidistants sur l'axe de l'hélice, et on obtenait la force totale en intégrant par la formule de Weddle (*Différences finies* de Boole, p. 47), à savoir,

$$\int_0^{6h} u_x dx = \frac{3}{10} h \{u_0 + u_2 + u_4 + u_6 + 5(u_1 + u_5) + 6u_3\} (*),$$

dans laquelle h est la distance de deux des points, et u_x l'intensité magnétique en un point en fonction de celle du dynamomètre.

(*) On a élevé des objections contre l'emploi de cette formule, qui attribue, comme on le fait observer, plus d'importance à u_1 et à u_5 qu'à u_2 et à u_4 , et ne fournit aucune approximation d'un caractère analytique légitime. Tout en reconnaissant pleinement la force de ces objections, je n'ai pas cru qu'il y eût lieu de faire un changement, pour la raison suivante : les expériences

Les dispositions mécaniques étaient les suivantes : Le dynamomètre était placé de telle sorte que le plan des tours de fil était exactement vertical et parallèle au méridien magnétique.

La ligne axiale des bobines était déterminée soigneusement et marquée au moyen de fils à plomb et de fils tendus transversalement et fixés sur la table.

Un fort support en bois, en forme de T, reposant sur trois vis ca-lantes, était disposé de telle sorte que la partie correspondante à la tige du T traversait les bobines dans un plan horizontal parallèle à leur axe ; sur cette tige était placée l'hélice, dont l'axe était mis en coïncidence parfaite avec celui des bobines.

Un cylindre en bois de buis, de 20 centimètres de longueur environ, était façonné au tour, de manière à s'adapter exactement dans l'intérieur de l'hélice ; à l'une de ses extrémités était fixé un fil de laiton long et épais terminé par une poignée, et près des bords de l'autre extrémité était fixée une cheville de laiton de 5 centimètres de longueur.

Au bout de cette cheville, on suspendait par un fil de cocon un aimant et un miroir, dont le poids est d'environ 1 grain (6,5 centigrammes) seulement ; quand la cheville était au point le plus haut, l'aimant se trouvait sur l'axe même du cylindre. L'hélice, dont l'axe coïncide avec celui des bobines, était ensuite poussée dans le sens de sa longueur, de façon que le point central des bobines se trouvât un peu en dehors d'une de ses extrémités.

On introduisait alors le cylindre, et on l'ajustait, à l'aide des fils tendus transversalement, de telle sorte que le miroir suspendu occupât exactement le point central : pour pouvoir amener toujours l'aimant dans cette même position, on faisait sur la poignée du cylindre une marque qui correspondait à une autre marque sur le support de l'instrument.

Lorsqu'on faisait ensuite glisser l'hélice le long de l'axe, l'aimant à l'intérieur pouvait toujours être placé au centre du dynamomètre. La distance entre les extrémités intérieures de l'hélice était divisée en six parties égales, au moyen de sept chevilles de bois plantées comme repères dans une règle de bois fixée le long du bord supérieur. En faisant glisser l'hélice dans le sens de sa longueur, jusqu'à ce qu'un des repères fût vu entre deux des fils verticaux placés au milieu de la dis-

faites avec des bobines de résistance sont susceptibles d'une précision si grande que les erreurs commises dans une détermination particulière, même quand elles sont multipliées par 5, ne peuvent pas affecter sensiblement la valeur de N qu'on déduit de ces expériences.

tance séparant les deux bobines, on pouvait comparer, à l'aide de l'aiguille située au centre, la force exercée par l'hélice au point considéré avec celle exercée par le dynamomètre.

On effectuait la comparaison en envoyant en sens contraires, dans l'hélice et dans les bobines, des courants d'intensités différentes et que l'on faisait varier jusqu'à ce que l'action sur l'aiguille fût nulle.

On obtenait ce résultat en divisant un courant en deux branches, l'une composée des bobines et l'autre de l'hélice, et en intercalant dans chaque branche des résistances différentes.

Le diagramme ci-dessous (fig. 187) montre les communications.

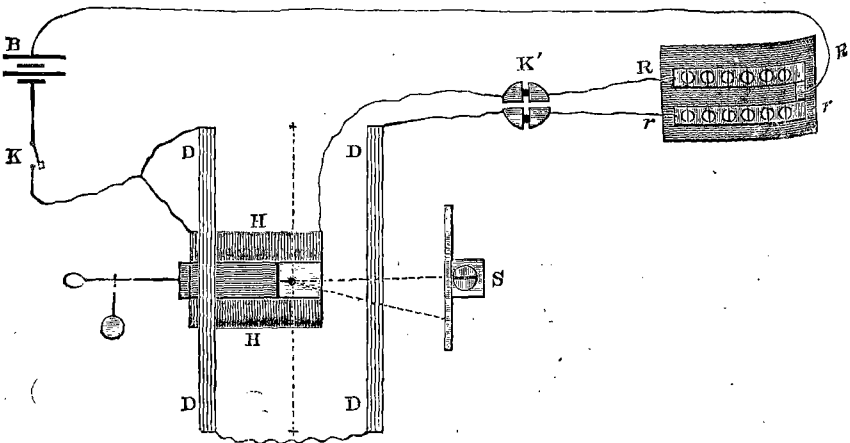


FIG. 187.

B est la pile, R et r les bobines de résistance.

D, les bobines du dynamomètre. } Les mêmes lettres représentent aussi
H, l'hélice. } leurs résistances.

● l'aimant et le miroir, dont la position angulaire est observée à l'aide de S, qui représente l'échelle et la lampe.

K K' sont des clefs de contact.

Lorsque les actions exercées sur l'aiguille sont égales, les *pouvoirs* des bobines, c'est-à-dire les forces qu'elles exerceraient respectivement quand le courant a l'unité d'intensité, sont en raison inverse des courants qui les traversent, c'est-à-dire en raison directe des résistances $r + D$ et $R + H$.

En répétant les observations pour chacun des sept points, on a l'intensité de l'action magnétique de l'hélice sur chacun de ces points, en fonction de celle du dynamomètre.

Si P est le *pouvoir* du dynamomètre qui correspond à l'unité de courant, et u_x le *pouvoir* de l'hélice en un point x avec le même courant, la différence des potentiels magnétiques aux bouts de l'hélice sera, pour l'unité de courant,

$$N = \int_0^{6h} u_x dx = \frac{3h}{10} P \left\{ \frac{H + R_0}{D + r_0} + \frac{H + R_{15}}{D + r_{21}} + \frac{H + R_{16}}{D + r_{16}} + \frac{H + R_{15}}{D + r_{03}} \right. \\ \left. + 5 \left(\frac{H + R_3}{D + r_4} + \frac{H + R_{16}}{D + r} \right) + 6 \frac{H + R_{16}}{D + r_4} \right\}$$

où h est $\frac{1}{6}$ de la longueur de l'hélice.

Avec l'hélice employée, on a obtenu les résultats suivants :

$$h = 4,39 \text{ centims.}, \quad \left\{ \begin{array}{l} H = 1,01, \text{ on prend } = 1,00, \\ D = 28,15 \quad \quad \quad = 28,1. \end{array} \right.$$

Valeurs moyennes de u_x pour différentes valeurs de r :

$r.$	$u_0.$	$u_1.$	$u_2.$	$u_3.$	$u_4.$	$u_5.$	$u_6.$
$r = 100$	2,724 P (*)	4,973 P	5,667 P	5,777 P	5,574 P	4,808 P	2,724 P
$r = 200$	2,762 P	4,976 P	5,659 P	5,725 P	5,572 P	4,814 P	2,722 P
$r = 1000$	2,722 P	4,962 P	5,681 P	5,798 P	5,592 P	4,639 P	2,723 P
Moyenne.	2,736 P	4,970 P	5,669 P	5,766 P	5,579 P	4,754 P	2,723 P

Spécimen d'observation.

$$r = 100, \quad u_3 = P \frac{739 + H}{100 + D} = 5,777 P,$$

d'où

$$N = \int_0^{6h} u_x dx = \frac{3}{10} \times 4,39 \text{ centims.} \{ 16,707 + 48,620 + 34,596 \} P \\ = 131,732 P.$$

(*) P est le « pouvoir » du dynamomètre.

Or $P = 81,1620$.

Donc $131,732 P = 10751,96$.

D'autre part, la valeur de N pour une hélice, avec l'unité de courant, prise par rapport à la longueur totale de son axe supposé indéfiniment prolongé dans les deux sens, est $4\pi n$, n étant le nombre de tours. (Voir *Electricity* de Clerk Maxwell, art. 676.)

Lorsque l est une longueur finie, comparée au rayon a , la valeur de N pour la partie de l'axe comprise entre les extrémités de l'hélice est :

$$N = 4\pi n \frac{\sqrt{l^2 + a^2} - a}{l}.$$

Si on calcule $n = \frac{N}{4\pi} \frac{l}{\sqrt{l^2 + a^2} - a}$, en donnant à a la valeur

du rayon moyen, on aura le nombre de tours de l'hélice.

Comme $a = 4,84$ centims., et $N = 10752$, nous avons :

$$n = \frac{10752}{4\pi} \frac{26,34}{\left\{26,34^2 + 4,84^2\right\}^{\frac{1}{2}} - 4,84};$$


$$\begin{aligned} \log n &= \log 10752 + \log 26,34 - \log 4\pi - \log \frac{\sqrt{l^2 + a^2} - a}{l} \\ &\quad \left\{ \text{ce dernier terme} = \log 21,92 \right\} \\ &= 4,0314893 + 1,4206158 - 1,0991971 - 1,3408405 \\ &= 3,0120680, \end{aligned}$$

d'où $n = 1928,15$.

Il y avait donc 1028 tours de fil dans l'hélice.

VÉRIFICATION

La couche extérieure de l'hélice renfermait 91 tours dans la longueur, et le rapport de cette longueur à la différence des rayons externe et interne était $\frac{26,34}{3,47} = 7,5$ environ.

Supposant que le nombre de couches par centimètre de rayon est le même que le nombre de tours par centimètre de longueur (il était en réalité un peu plus grand, car les tours d'une couche entraient dans les interstices de la suivante, ) , nous avons

$$n = \left\{ 91 \times \frac{91}{7,5} \right\} = 1092,$$

résultat suffisamment approché de celui obtenu par le calcul, savoir $n = 1028$, pour prouver qu'il n'a pas été commis d'erreur grossière, comme, par exemple, si l'on s'était trompé sur la caractéristique d'un logarithme.

Il était difficile d'attendre une concordance plus grande, car l'hélice avait été construite dans un but différent, et on n'avait pas pris de soin spécial pour avoir un enroulement uniforme. De plus, il était probable que le constructeur s'était plus particulièrement attaché à enrouler régulièrement les uns contre les autres les tours de la couche extérieure, qui était visible, que ceux des couches intérieures, qui étaient cachées.

SOMME DES AIRES

Pour mesurer l'effet magnétique d'un courant donné sur un point *extérieur* à l'hélice, il faut connaître la somme des aires de tous les tours de l'hélice.

Appelons cette quantité $\Sigma (A)$ pour l'hélice et $\Sigma (A')$ pour le dynamomètre.

$\Sigma (A')$ est connu par mesure directe et est égal à 870 200 centimètres carrés.

Pour déterminer $\Sigma (A)$, l'hélice et le dynamomètre étaient placés de façon à être parfaitement concentriques. On suspendait un aimant et un miroir à une distance d'un peu plus d'un mètre, d'abord en avant, puis en arrière, afin de corriger toute erreur dans le centrage; on faisait passer des courants CC' en sens opposés, et on les faisait varier jusqu'à ce qu'il n'y eût plus de déviation.

A cette distance, on pouvait supposer l'hélice et le dynamomètre remplacés par leurs disques magnétiques équivalents, et la différence entre les distances respectives à l'aimant des centres de leurs sections extrêmes était négligeable par rapport à ces quantités elles-mêmes.

La formule pour $\Sigma (A)$ devient alors :

$$\Sigma (A) = \frac{C'}{C} \Sigma (A').$$

Il n'y avait pas d'action sur l'aimant suspendu, lorsque

$$\frac{C}{C'} = 11,23,$$

ce qui donne $\Sigma (A) = 77488,8$ centim. carrés (1).

(1) Mesure faite par le professeur Clerk Maxwell.

Une autre détermination, avec un dynamomètre différent, donnait $\Sigma (A) = 77\,417,2$ centim. carrés (1).

CALCUL DE L'INTENSITÉ C D'UN COURANT PASSANT DANS L'HÉLICE
EN FONCTION DE LA DÉVIATION δ DE L'AIMANT SUSPENDU

Lorsqu'on connaît la somme des aires, l'hélice peut être traitée comme son propre galvanomètre; c'est-à-dire que l'intensité du courant qui passe dans l'hélice peut être calculée d'après la déviation d'un aimant extérieur.

L'hélice doit être placée de façon que son axe soit dans la direction magnétique est-ouest, et l'aimant doit être suspendu de façon à se trouver dans le plan passant par le centre de l'hélice (2).

On démontre mathématiquement que si r est la distance de l'aimant au centre d'une des extrémités de l'hélice, $2l$ la longueur de l'aimant suspendu, m l'intensité de son pôle, et H la composante horizontale du magnétisme terrestre, on doit avoir

$$Hml \operatorname{tang} \delta = \Sigma (A) \frac{ml}{r^3} C$$

ou

$$H \operatorname{tang} \delta = \frac{C \Sigma (A)}{r^3},$$

ce qui donne

$$C = \frac{Hr^3}{\Sigma (A)} \operatorname{tang} \delta.$$

II

BOBINE BIFILAIRE DE WEBER (3)

On a vu (chapitre XXII) qu'un courant fini de surface A et d'intensité C pouvait être remplacé dans ses actions à distance par un aimant dont le moment magnétique serait $M = AC$. Il en sera de même si, au lieu d'un seul courant, on a un solénoïde ou une bobine plate, A désignant alors la somme des surfaces des cercles parcourus par le courant. Un pareil système se comportera comme un aimant $M = AC$, dont l'axe se confondrait avec celui du courant.

(1) Mesure faite par l'auteur.

(2) *Phil. Trans.*, 1877, pp. 12 et 16.

(3) Par J. R.

La *bobine bifilaire* de Weber consiste en une bobine plate suspendue verticalement au moyen de deux fils qui s'en détachent tangentiellement pour se mettre en communication avec la pile. Si le plan du bifilaire est parallèle au méridien magnétique, lorsque la bobine est à l'état neutre, on la voit se tordre sous l'action de la terre dès qu'on fait passer le courant, et l'équilibre s'établit lorsque le moment du couple terrestre est égal au moment de torsion du bifilaire.

L'axe de la bobine, d'abord perpendiculaire au méridien magnétique, déviant d'un angle δ , sera alors à $90^\circ - \delta$ du méridien magnétique; le moment du couple terrestre sera donc $HAC \cos \delta$.

Lorsque le bifilaire tourne autour de la verticale, les deux fils de suspension ne se trouvent plus dans le même plan: leur direction devenant oblique et leur longueur étant invariable, il faut que le centre de gravité se soit élevé. Il en résulte un couple horizontal qui tend à ramener la bobine dans sa position primitive. a et b étant les écartements des fils sur l'axe de suspension et sur la bobine, l la longueur d'un fil, p le poids de la bobine, le *couple statique* Δ du bifilaire est $\Delta = \frac{ab}{l} p$ (1). On peut d'ailleurs déterminer Δ expérimentalement par la méthode des oscillations, car on a

$$\Delta = \frac{\pi^2 I}{t^2},$$

I étant le moment d'inertie de la bobine (qu'on mesure comme celui d'un aimant, ch. XII) et t la durée d'une demi-oscillation. L'axe du bifilaire déviant de δ , le moment du couple qui tend à le ramener à sa position primitive est $\Delta \sin \delta$. On a donc

$$HAC \cos \delta = \Delta \sin \delta,$$

d'où

$$CH = \frac{\Delta}{A} \operatorname{tang} \delta.$$

On peut appliquer encore au bifilaire la méthode des oscillations.

On fait osciller le bifilaire traversé par le courant et on mesure la durée t , de l'oscillation. On a

$$\Delta + ACH = \pi^2 \frac{I}{t}.$$

(1) Voy. Traité de De la Rive, vol. III, p. 772.

On recommence en changeant le sens du courant :

$$\Delta - ACH = \pi^2 \frac{t_1^2}{t_2^2}.$$

De ces deux relations, on tire :

$$CH = \frac{\Delta}{A} \frac{t_1 - t_1^2}{t_1 + t_1^2}.$$

Le bifilaire permet donc d'obtenir le produit C II.

MESURE ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE L'INTENSITÉ HORIZONTALE H
DE LA TERRE

La boussole des tangentes donne le rapport $\frac{C}{H}$ et le bifilaire le produit CH. Faisons traverser à la fois les deux appareils par le même courant, en les intercalant dans le même circuit, et soient θ la déviation de la boussole des tangentes et δ celle du bifilaire, on a, pour la boussole des tangentes,

$$\frac{C}{H} = \frac{a^3}{2A} \operatorname{tang} \theta,$$

a étant le rayon moyen des tours de fil, A leur surface totale ($n \pi a^2$ s'il y a n tours de fil), et pour le bifilaire.

$$CH = \frac{\Delta}{A'} \operatorname{tang} \delta.$$

Le produit des deux relations donne

$$C^2 = \frac{\Delta a^3}{2AA'} \operatorname{tang} \theta \operatorname{tang} \delta,$$

et leur quotient

$$H^2 = \frac{2\Delta A \operatorname{tang} \delta}{A' a^3 \operatorname{tang} \theta}.$$

Cette méthode, due à Weber, a été appliquée par M. Kohlrausch, et plus tard, en 1870, par MM. Cornu et Baille, comme vérification de la méthode de Gauss (Ch. XII).

ACTION D'UNE BOBINE FIXE SUR BIFILAIRE (1).

Plaçons les axes des deux bobines à la distance D dans la situation relative des aimants de Gauss (1^{re} position). Le bifilaire dévient d'un angle δ , l'équilibre a lieu sous l'action de 3 forces :

	Moment.
1 ^o Action de la bobine fixe.....	$\frac{AA'C^2}{D^3} \cos \delta$;
2 ^o Torsion du bifilaire.....	$\Delta \sin \delta$;
3 ^o Action de la terre.....	$\pm A'CH \sin \delta$,

ce qui donne la relation

$$\frac{AA'C^2}{D^3} = (\Delta \pm A'CH) \operatorname{tang} \delta.$$

$A'CH$ est toujours très petit par rapport à Δ ; on pourra donc souvent négliger le couple terrestre; on peut aussi facilement le calculer, soit par la déviation du bifilaire sous l'action de la terre, soit par la méthode des oscillations, qui fait connaître le rapport $\frac{A'CH}{\Delta}$.

On a donc

$$D^3 \operatorname{tang} \delta = \frac{AA'C^2}{\Delta \pm A'CH}.$$

En plaçant les axes des deux bobines dans la situation respective des aimants de Gauss (2^e position), le moment du couple exercé par la bobine fixe serait $\frac{2AA'C^2 \cos \delta}{D^3}$, et on aurait

$$D^3 \operatorname{tang} \delta = \frac{2AA'C^2}{\Delta \pm A'CH}.$$

Ces relations supposent les dimensions des bobines très petites par rapport à leur distance D . Mais si elles ont des dimensions comparables à D , l'expérience prouve qu'on peut poser

$$D^3 \operatorname{tang} \delta = P + \frac{Q}{D^2}.$$

P et Q sont déterminés par la moyenne d'un certain nombre d'expé-

(1) M. Bertin, *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, vol. XIX, p. 496 (1870).

riences, et P étant la valeur de $D^3 \operatorname{tang} \delta$ quand D est très grand, on pourra poser $P = \frac{AA'C^2}{\Delta \pm A'CH}$ dans la 1^{re} position, ou le double de cette quantité dans la seconde.

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DU PRINCIPE D'AMPÈRE

La vérification expérimentale de ces formules est une confirmation de ce principe fondamental d'ampères, que les actions élémentaires de deux courants sont proportionnelles au produit de leurs intensités, et, par conséquent, au carré de l'intensité quand les deux courants sont égaux. Weber a fait encore la vérification suivante :

Il a fait passer le courant dans une troisième bobine, éloignée des deux premières, et qui agissait à distance sur un magnétomètre formé par un simple miroir aimanté supporté par un fil de cocon. Le courant C, qui traversait les trois bobines, produisait dans le bifilaire une déviation δ , et dans le magnétomètre une déviation θ . La tangente de la première déviation devait être proportionnelle à C^2 , celle de la seconde à C, de sorte que, K étant une constante, on devait avoir

$$\operatorname{tang} \delta = K \operatorname{tang}^2 \theta,$$

ce que l'expérience a confirmé pour toutes les valeurs de D, même lorsque D étant nul, la bobine bifilaire est placée dans l'intérieur de la bobine fixe.

THÉORIE DE L'ÉLECTRO-DYNAMOMÈTRE DE WEBER

C'est lorsque les bobines sont dans cette position particulière, c'est-à-dire lorsque leurs centres sont en coïncidence, que l'appareil de Weber porte plus spécialement le nom d'*électro-dynamomètre*. On l'oriente de manière que la bobine mobile ait d'abord son axe dans le méridien magnétique, la bobine fixe étant à angle droit sur la première. Dès que le courant passe, la première est déviée d'un angle δ .

a et a' étant les rayons des bobines fixe et mobile, n et n' les nombres de tours, il faut faire dans les formules précédentes $a = D$; alors

$$a^3 \operatorname{tang} \delta = \frac{AA'C^2}{\Delta \pm A'CH} = \frac{\pi^2 nn' a^2 a'^2 C^2}{\Delta \pm n' \pi a'^2 CH}$$

Posant $\frac{AA'}{a^3} = K$ et $\Delta \pm A'CH = M$, il vient

$$C^2 = \frac{M}{K} \operatorname{tang} \delta.$$

Le coefficient $\frac{M}{K}$ se déterminera en grandeur absolue en faisant passer le courant soit à travers une *boussole des tangentes*, soit à travers une bobine agissant à distance sur un *magnétomètre*. La boussole des tangentes, par exemple, donnera $C = \frac{\alpha H}{2\pi} \text{ tang } \theta$, d'où

$$\frac{\alpha^2 H^2 \text{ tang}^2 \theta}{4\pi^2} = \frac{M}{K} \text{ tang } \delta, \text{ équation qui déterminera le coefficient } \frac{M}{K}.$$

EMPLOI DE L'ÉLECTRO-DYNAMOMÈTRE A LA MESURE
DES COURANTS ALTERNATIFS

Si l'on fait passer dans l'appareil des courants de sens contraires, l'action réciproque des deux bobines ne changera pas de signe : l'action de la terre changera de signe ; mais si on la suppose négligeable, le bifilaire aura dans les deux cas la même déviation. On pourra toujours rendre négligeable l'action de la terre, soit en diminuant l'intensité du courant, soit en écartant les fils du bifilaire, ce qui augmente son coefficient de torsion ; si alors on fait passer à travers l'appareil une succession rapide de courants égaux, et alternativement de sens contraires, tels que les courants d'induction, on observera une déviation permanente δ , et l'intensité du courant sera mesurée par la formule

$$C^2 = \frac{M}{K} \text{ tang } \delta.$$

« L'électro-dynamomètre est donc admirablement propre à la mesure des courants induits ; c'est, pour ainsi dire, un galvanomètre dont les indications ne dépendent que de l'intensité et non du sens du courant (1). »

MESURE DE LA DURÉE DES COURANTS INSTANTANÉS

Faisons passer un même courant instantané de durée θ dans un galvanomètre et dans un électro-dynamomètre, et mesurons les arcs d'impulsion fournis par chacun des instruments. Les indications du premier instrument feront connaître $C\theta$ et celles du second $C^2\theta$, et, connaissant les moments d'inertie des deux instruments ou leurs durées d'oscillation, on pourra en déduire par le calcul les valeurs de C et de θ . Cette méthode a été appliquée par Weber (2).

(1) M. Bertin, *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, vol. XIX, p. 500 (1870).

(2) *Ibid.* et vol. XXII, p. 489.

Elle suppose essentiellement que l'intensité C est constante. Si l'intensité du courant a une valeur variable i , l'impulsion du galvanomètre fait connaître $\int_0^0 idt$ et celle de l'électro-dynamomètre $\int_0^0 i^2 dt$. On peut toujours considérer une intensité moyenne C telle que $C\theta = \int_0^0 idt$, et trouver une autre valeur C' telle que $C'^2\theta = \int_0^0 i^2 dt$; mais si i n'est pas constant, on ne peut pas admettre que $C=C'$.

Aussi la méthode de Weber n'est-elle pas applicable aux courants induits, et M. Rijke, qui a voulu mesurer par cette méthode (en admettant $C=C'$) la durée des extra-courants direct et inverse, est arrivé à cette conclusion inexacte que le direct dure plus que l'inverse.

DESCRIPTION DE L'ÉLECTRO-DYNAMOMÈTRE DE WEBER (1)

Les figures 188 et 189 représentent deux coupes verticales à angle droit de l'appareil; la figure 190, une coupe horizontale vue d'en bas. Les deux bobines sont formées de fils de cuivre recouverts de soie, enroulés très régulièrement. La bobine mobile, qui peut se mouvoir librement à l'intérieur de la bobine fixe, est soutenue par deux fils métalliques très fins, supportant chacun la moitié de son poids, de façon à être également tendus. Ces fils de suspension, partant de la bobine qu'ils supportent, viennent s'appuyer contre deux petites poulies de métal a et a' et se fixer autour de deux petites tiges b et b' implantées sur une poulie d'ivoire B . Cette poulie peut être abaissée ou élevée au moyen de la vis ee' qui se meut dans l'écrou ff' , de façon à pouvoir amener le centre de la bobine mobile en coïncidence avec celui de la bobine fixe. La section transversale de celle-ci est figurée en mm' . La bobine mobile porte un miroir pour la mesure des petits angles. Ce miroir mn et son contre-poids pp font saillie hors de la bobine fixe.

Le système est enfermé dans une cage de bois munie de glaces, laissant passer le tubè où sont les fils de suspension et permettant de voir la graduation circulaire ainsi que l'index ii que porte la bobine mobile (fig. 190).

La seconde coupe verticale (fig. 189), permet de suivre la marche du courant. Les 4 boutons métalliques u, u', z, z' fixés contre la cage servent à fermer le circuit; u et u' sont en communication avec les deux extrémités du fil de la bobine fixe, en sorte que le courant parti de u arrive en u' , après avoir traversé ce fil, monte le long du fil $g'g'$,

(1) De la Rive, vol. I, p. 268.

arrive à l'écrou *c'*, puis à la petite poulie *a'*, d'où il descend par le fil de suspension dans la bobine mobile, puis passe au second fil de

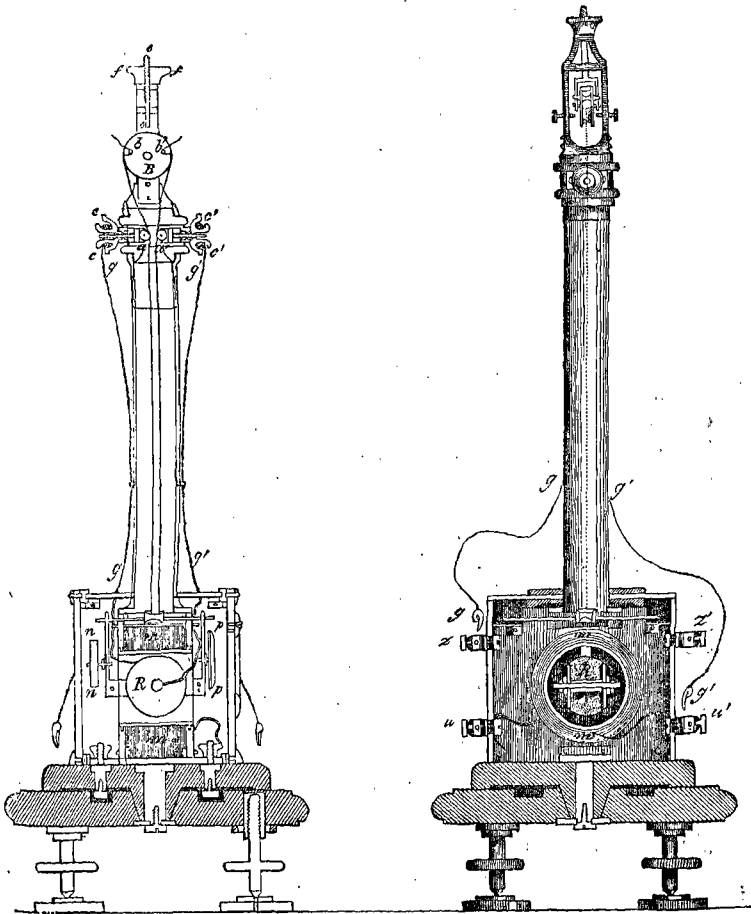


FIG. 188.

FIG. 189.

suspension d'où il parvient à la poulie *a*; de là, par le second écrou *cc* au fil *gg* et au bouton *z* relié au pôle négatif de la pile. En combinaison. Électricité.

II. — 4

nant convenablement les conducteurs au moyen des 4 boutons, on peut facilement changer le sens du courant dans l'une des bobines seulement ou dans toutes les deux.

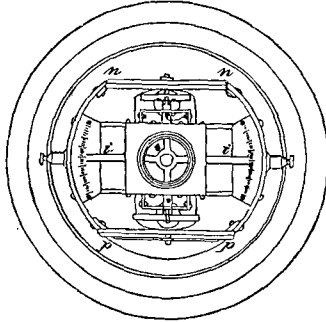


Fig. 190.

Le fil de la bobine mobile a 200 mètres de longueur et fait 1 200 tours ; celui de la bobine fixe a 300 mètres et fait 900 tours seulement. Les fils de suspension, très fins, sont en argent et ont été rougis au feu ; ils ont 0^m,50 depuis la bobine jusqu'aux poulies *a* et *a'*.

AUTRES FORMES D'ÉLECTRO-DYNAMOMÈTRES.

Dans l'électro-dynamomètre à poids de M. Joule, la bobine mobile est suspendue à l'extrémité d'un fléau de balance : elle occupe une position horizontale et peut se mouvoir verticalement. La bobine fixe est placée au-dessous de cette dernière, en sorte que les spires des deux bobines ont leurs plans parallèles. La force qui s'exerce entre les deux bobines est alors mesurée par le poids qu'il faut ajouter ou enlever au plateau suspendu à l'autre bout du fléau et faisant équilibre à la bobine mobile.

Dans d'autres appareils, la bobine suspendue est fixée à l'extrémité du bras horizontal d'une balance de torsion, avec ses spires dans des plans verticaux : de chaque côté on place deux bobines fixes, dont l'une l'attire et l'autre la repousse, en sorte que les actions s'ajoutent.

On peut fixer une seconde bobine suspendue à l'autre extrémité du bras de la balance de torsion, et la placer également entre deux bobines fixes. Si les deux bobines suspendues sont identiques et traversées par le courant dans des directions opposées, l'effet du magnétisme terrestre, sur la position du bras de la balance de torsion se trouve tout à fait éliminé.

J. R.

CHAPITRE XXXI

ÉLECTRO-AIMANTS. — DIAMAGNÉTISME, ACTION DU MAGNÉTISME SUR LES CRISTAUX

Si l'on enroule un fil isolé autour d'un barreau de fer ou d'acier, et que l'on y fasse passer un courant électrique, le noyau devient un aimant dont le bout marqué prend la position à laquelle s'arrêterait le bout marqué d'un aimant permanent libre de se mouvoir à l'intérieur de l'hélice, à la place du noyau de fer. Si le noyau est en fer doux, il s'aimante quand le courant passe et perd son magnétisme quand le courant cesse. Si le barreau est d'acier, il met de la résistance à prendre l'état magnétique ; mais, une fois aimanté, il garde indéfiniment ses propriétés après que le courant a cessé.

On profite de la propriété du fer doux pour construire des « électro-aimants », au moyen desquels on obtient des forces magnétiques bien plus grandes que celles données par des aimants d'acier, avec cet avantage de plus que l'on en dispose entièrement ; car, dans de certaines limites, la force de l'aimant temporaire est proportionnelle à la force du courant qui traverse le fil.

Les électro-aimants sont souvent faits en forme de fer à cheval : ils sont alors formés de deux tiges cylindriques de fer parallèles, reliées à un bout par une culasse massive du même métal. Les fils sont enroulés sur des cylindres

de laiton creux (1), permettant d'introduire et retirer les tiges de fer.

Un aimant, appartenant à l'auteur, est formé d'un « fer à cheval » (fig. 191) dont les branches ont 33 centimètres de long et 6,35 de diamètre ; les hélices, qui ont 30,5 centimètres de long et 12,7 de diamètre extérieur, contiennent chacune environ 1 000 tours de fil de cuivre isolé, n° 18 de la jauge de Birmingham ($1^{\text{mm}},25$). Les hélices pèsent environ 15 kilogrammes chacune. Un tel aimant, mis les pôles en bas et traversé par un courant énergique, porterait probablement un poids de 1 à 3 tonnes attaché à son armature. Mais c'est à un autre usage que l'on emploie des aimants de cette taille. Leur action magnétique est si intense qu'elle influence presque toutes les substances connues, en outre des quelques corps généralement connus comme magnétiques. L'action sur la plupart des substances est trop faible pour qu'on puisse observer directement l'attraction ou la répulsion.

Pour observer l'action sur un morceau de verre, par exemple, on met l'aimant vertical, la culasse en bas. Les pôles libres dépassent alors les hélices de 25 centimètres environ. Deux morceaux de fer doux, appelés pôles mobiles, sont placés au sommet des noyaux. Un corps placé entre ces blocs de fer est, en fait, placé entre deux pôles horizontaux.

En faisant glisser les blocs, on rapproche les pôles tout près l'un de l'autre, ou bien on les écarte de 12,7 centimètres environ. Un bout du bloc est plat, de façon à donner une

(1) Ces cylindres peuvent être aussi en bois ou en carton. Quand ils sont en laiton, il se produit des courants d'induction qui retardent l'aimantation ou la désaimantation des noyaux : on empêche ces courants en fendant les cylindres suivant une génératrice.

surface polaire plane et verticale et formant un carré d'environ 5 centimètres de côté; l'autre bout est allongé en

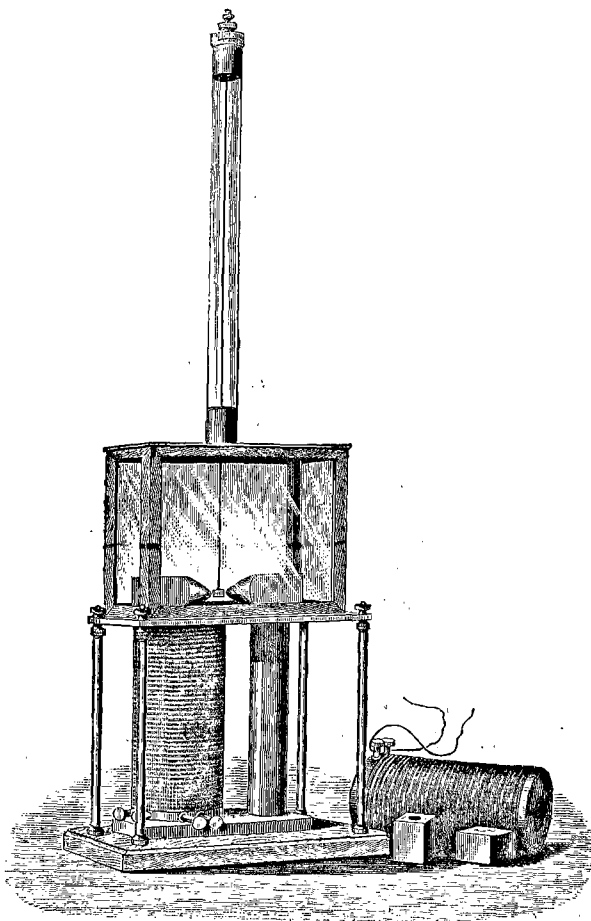


FIG. 101.

pointe mousse. On peut mettre en regard les bouts plats ou les bouts allongés. Un corps placé entre les pôles allongés

est soumis à des forces plus intenses ; entre les pôles plats, il est dans un champ de force plus uniforme, l'effet des pointes étant de concentrer l'action magnétique en un point.

Pour mesurer les actions magnétiques des corps très peu influencés par l'aimant, on emploie la balance de torsion, modification de la balance de Coulomb décrite dans la première partie (1). Un corps homogène, suspendu entre les pôles par un fil de torsion, prendra sa position d'équilibre, s'il est attiré, avec son diamètre le plus long suivant la ligne des pôles ; et s'il est repoussé, avec son diamètre le plus long perpendiculaire à la ligne des pôles.

Définition. — *On appelle ligne axiale la ligne qui joint les pôles ; ligne équatoriale, la ligne qui lui est perpendiculaire.*

La grandeur de l'attraction ou de la répulsion peut se mesurer par le nombre de degrés de torsion nécessaires pour écarter le corps suspendu d'un nombre déterminé de degrés de sa position de repos.

Définition. — *Le fer et les autres corps analogues qui sont attirés par l'aimant, sont appelés ferro-magnétiques, et quelquefois paramagnétiques. Les substances qui sont repoussées sont appelées diamagnétiques.*

Le type des corps diamagnétiques est le bismuth, qui est repoussé avec une force considérable par un aimant puissant. Une petite boule, de 6 millimètres de diamètre, suspendue à un fil de 60 centimètres de long, par exemple, entre les pôles allongés d'un aimant puissant, peut être repoussée avec assez de force pour sortir de la verticale de 6 millimètres.

(1) Vol. I, p. 48.

Les phénomènes de diamagnétisme ont été observés pour la première fois par Faraday (1) sur un morceau de verre lourd qu'il avait employé précédemment à ses expériences sur la rotation du plan de polarisation décrites à la quatrième partie de cet ouvrage. Le mémoire contenant l'indication de la découverte du diamagnétisme a été lu à la Société Royale le 18 décembre 1845, et se trouve dans les *Phil. Trans.* pour 1846, et dans les *Experimental Researches* (2243).

Dans ces premières expériences, une baguette de verre lourd était suspendue entre les pôles du grand aimant en fer à cheval de l'Institution Royale. On a trouvé qu'elle se mettait toujours suivant la ligne équatoriale, c'est-à-dire à angle droit sur la ligne des pôles, et que dans cette position elle était en équilibre stable. Il y avait aussi une autre position d'équilibre, quand la longueur de la baguette était exactement suivant la ligne axiale; mais dans ce cas, l'équilibre était instable, et, au moindre déplacement, la baguette venait prendre la position équatoriale.

On ne pouvait reconnaître de différence entre les bouts de la baguette; la direction vers laquelle était tourné chaque bout dans la position d'équilibre stable ne dépendait que du sens dans lequel il avait été écarté de sa position d'équilibre instable: on voit par là que le verre n'acquiert pas de polarité permanente, analogue à la polarité d'un aimant d'acier.

Faraday continua ses expériences sur un grand nombre de substances, parmi lesquelles le phosphore manifesta le

(1) « Des observations isolées de Brugmans, Becquerel, Le Baillif, Saigy et Leebeck avaient révélé l'existence d'une force répulsive s'exerçant entre l'aimant et deux ou trois substances; mais ces expériences, inconnues de Faraday, n'avaient été ni étendues ni examinées. » Tyndall, *Faraday inventeur*, p. 410.

phénomène « aussi fortement, sinon plus, que le verre lourd ». Il fit aussi des expériences sur un grand nombre de liquides : il les renfermait dans un tube de verre très mince, dont la forme est représentée dans la figure 192.

Naturellement on tenait compte de l'action du verre lui-même, mais, en faisant le tube en flint extrêmement mince, on pouvait rendre son action très petite, et, par des expériences alternatives avec le tube plein ou vide, on déter-

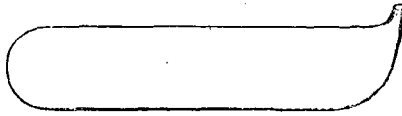


FIG. 192.

minait aisément l'action propre du liquide. La forme du tube dispensait de le fermer; point important, car le bouchon, la cire à cacheter et d'autres substances sont généralement magnétiques, à moins qu'on ne prenne des soins particuliers pour les préparer exempts de fer.

Voici la liste des substances que Faraday a reconnues être diamagnétiques :

Cristal de roche.	Acétate de plomb.
Sulfate de chaux.	Tartrate de potasse et d'anti-
— de baryte.	moine.
— de soude.	Tartrate de potasse et de soude.
— de potasse.	Acide tartrique.
— de magnésie.	Acide citrique.
Alun.	Huile d'olives.
Chlorhydrate d'ammoniaque.	Térébenthine.
Chlorure de plomb.	Jais.
— de sodium.	Caoutchouc.
Azotate de potasse.	Sucre.
— de plomb.	Amidon.
Carbonate de soude.	Gomme arabique.
Spath d'Islande.	Bois.

Ivoire.	Résine.
Eau.	Spermaceti.
Alcool.	Caféine.
Éther.	Quinine.
Acide nitrique.	Acide margarique.
Acide sulfurique.	Gomme laque.
Acide chlorhydrique.	Cire à cacheter.
Solutions de sels alcalins et ter- reux.	Mouton sec.
Verre.	Bœuf frais.
Litharge.	Bœuf sec.
Arsenic blanc.	Sang frais.
Iode.	Sang sec.
Phosphore.	Cuir.
Soufre.	Pomme.
	Pain.

Parmi les métaux, Faraday a reconnu que les suivants sont diamagnétiques :

Antimoine.	Plomb.
Bismuth.	Mercure.
Cadmium.	Argent.
Cuivre.	Étain.
Or.	Zinc.

Le fer, le nickel et le cobalt sont certainement paramagnétiques ; le platine, le palladium et le titane présentent des effets paramagnétiques si faibles qu'on ne peut savoir s'ils ne sont pas dus à la présence accidentelle de fer, de nickel ou de cobalt.

D'une manière générale, la distinction des substances diamagnétiques et paramagnétiques est la suivante : les paramagnétiques tendent à se mouvoir des points où la force est faible à ceux où elle est intense ; les diamagnétiques tendent à se mouvoir des points où la force est intense à ceux où elle est faible. Faraday a reconnu que presque tous les composés de métaux paramagnétiques

sont eux-mêmes paramagnétiques. Le sang et le cyanoferrure jaune de potassium sont des exceptions ; tous deux contiennent du fer et cependant sont diamagnétiques.

D'expériences ultérieures Faraday a déduit la liste suivante, qui commence par le fer, le plus énergique paramagnétique, et qui finit par le bismuth, le plus fort diamagnétique. Les métaux les plus voisins du point neutre 0 sont les métaux paramagnétiques ou diamagnétiques qui exercent le moins d'action.

Magnétiques.

Fer.
Nickel.
Cobalt.
Manganèse.
Chrome.
Cérium.
Titane.
Palladium.
Platine.
Osmium.

Diamagnétiques.

Bismuth.
Antimoine.
Zinc.
Cadmium.
Sodium.
Mercure.
Plomb.
Argent.
Cuivre.
Or.
Arsenic.
Urane.
Rhodium.
Iridium.
Tungstène.

 0

Il faut se rappeler que le diamagnétisme du bismuth est bien plus faible que le magnétisme du fer.

L'intensité du pôle d'un électro-aimant ayant un noyau de fer est de 32 à 45 fois la force magnétisante, tandis qu'avec un noyau de bismuth elle n'en serait que la

— $\frac{1}{400\,000}$ partie.

POLARITÉ DIAMAGNÉTIQUE

Aussitôt que les faits de diamagnétisme furent établis, la question se posa : Les effets observés sont-ils dus à une simple répulsion, ou bien y a-t-il une véritable polarité diamagnétique induite ? En d'autres termes, les corps diamagnétiques deviennent-ils, sous l'influence de forces magnétiques, des aimants temporaires de la même façon que des morceaux de fer doux placés dans les mêmes circonstances, avec cette seule différence que les pôles sont en sens inverses ?

Tandis que le pôle marqué d'un aimant induit, dans une pièce de fer doux placée dans le voisinage, un pôle non marqué dans la partie la plus voisine et un pôle marqué dans la partie la plus éloignée ; dans l'hypothèse de la polarité diamagnétique, nous aurions, en substituant du verre lourd au fer doux, un pôle marqué à la partie la plus voisine du pôle marqué de l'aimant inducteur, et un pôle non marqué à la partie la plus éloignée. Faraday a fait plusieurs tentatives pour déterminer si la polarité diamagnétique existe ou non (1). Sa méthode consistait à placer à un des bouts d'un électro-aimant une hélice supplémentaire, non reliée à la pile, mais en communication avec un galvanomètre sensible. Dans cette hélice, il plaçait des barreaux de bismuth et d'autres substances diamagnétiques dont le bout était très rapproché du bout du noyau de l'électro-aimant. Si le barreau de bismuth a pris un état polaire, on devra induire un courant dans l'hélice qui l'entoure, quand on l'éloignera subitement de l'aimant pendant que celui-ci est traversé par le courant, et on devra

(1) *Experimental Researches*, 2640.

induire un courant de sens inverse en rapprochant le barreau. Faraday attachait les barreaux de bismuth à une manivelle actionnée par un volant, et de cette façon on pouvait les mouvoir rapidement en avant ou en arrière : un commutateur, conduit par le même mécanisme, envoyait tous les courants dans le même sens à travers le galvanomètre.

Il ne put néanmoins obtenir aucun indice en faveur de la polarité diamagnétique. Son appareil ne paraît pas avoir été d'une extrême sensibilité. En particulier, il était presque impossible d'établir un synchronisme exact entre les renversements du courant par le commutateur et les renversements du mouvement du cylindre de bismuth, ce qui doit avoir fort obscurci tous les effets produits. Il était nécessaire d'employer un commutateur, parce que l'on n'avait pas encore inventé d'appareil à bobine suspendue, comme le petit dynamomètre employé maintenant pour mesurer les courants alternatifs. De même, son galvanomètre, quoiqu'il fût astatique et très sensible, ne pourrait être comparé, pour la délicatesse, aux instruments à réflexion qu'on a inventés depuis. Les résultats obtenus par Faraday avec des cristaux de protosulfate de fer, comparés aux résultats donnés par la même substance dans les expériences du professeur Tyndall (que nous allons décrire), montrent que les appareils de ce dernier étaient environ cent fois plus sensibles que ceux de Faraday. Matteucci étudia aussi la question, mais sans résultats décisifs.

En 1851, Verdet publia quelques expériences (1), qui lui firent rejeter l'hypothèse de la polarité diamagnétique. Voici quelle était la méthode de ses expériences.

Des hélices, semblables à celles d'un électro-aimant,

(1) *Ann. de chimie*, III^e série, t. XXXI, p. 187. *Œuvres de Verdet*, t. I, p. 43.

étaient placées sur les branches d'un grand aimant permanent d'acier, en fer à cheval. Devant les pôles de l'aimant on faisait tourner rapidement un barreau de la substance diamagnétique, autour d'un axe perpendiculaire à sa longueur, au moyen d'une roue de transmission. On n'employait pas de pile ; mais les bouts de l'hélice étaient reliés à un galvanomètre sensible, assez éloigné de l'aimant pour être soustrait à son action directe. Quand un barreau de fer était substitué au corps diamagnétique, l'aimant d'acier induisait dans le fer une polarité magnétique qui changeait constamment pendant la rotation du barreau : celui-ci devenait ainsi un aimant variable, qui, réagissant sur l'aimant d'acier, produisait des changements temporaires dans son aimantation ; ces changements induisaient dans les hélices des courants dont on observait les effets au galvanomètre.

Dans une seconde série d'expériences, l'aimant d'acier était remplacé par un électro-aimant à fer doux, excité par une pile, dont l'hélice, formée de quelques couches de fil seulement, était à l'intérieur de l'hélice reliée au galvanomètre.

Verdet espérait que, si la polarité diamagnétique existait, la substitution d'un barreau de bismuth à un barreau de fer renverserait le sens de la déviation du galvanomètre. On n'observa aucun effet de ce genre, et ce résultat négatif lui fit conclure contre l'existence de la polarité diamagnétique.

La raison pour laquelle Verdet n'observait pas cette inversion d'effets est assez évidente. Tous ses diamagnétiques étaient conducteurs de l'électricité : polarisés ou non, des courants électriques y étaient induits et réagissaient directement sur les hélices. Ces courants induits étaient absolument indépendants de la polarité magnétique des corps, et

étaient assez considérables pour masquer entièrement l'effet de la véritable action diamagnétique.

En 1855, le professeur Tyndall a publié le compte-rendu (1) d'une série d'expériences dans lesquelles il a obtenu une démonstration de la polarité du bismuth complètement indépendante.

Le barreau de bismuth *U* (fig. 193) était suspendu à

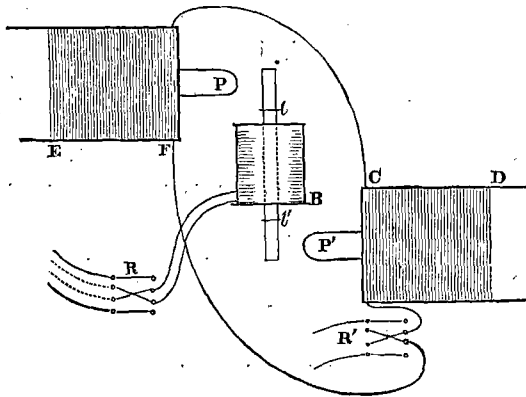
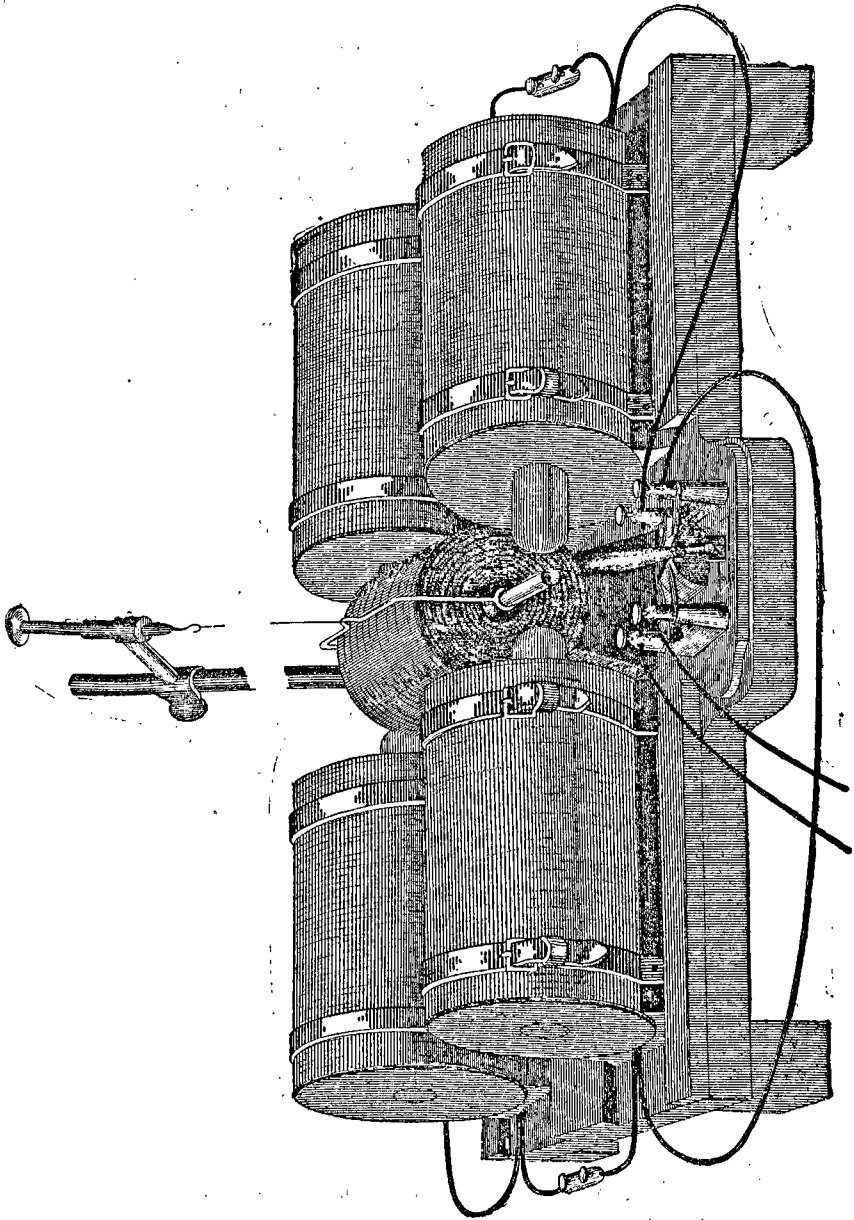


FIG. 193.

l'intérieur d'une bobine fixe B, dont le diamètre intérieur est beaucoup plus grand que la largeur du barreau ; de sorte que, entre certaines limites, le barreau pouvait osciller comme l'aiguille d'un galvanomètre. Deux électro-aimants simples PP' sont placés dans la position indiquée. On sait que si on remplace le barreau de bismuth par un barreau de fer, celui-ci sera aimanté par le courant de l'hélice B et dévié à droite ou à gauche par les pôles PP', suivant le sens des courants dans l'hélice et les bobines. Quand

(1) Tyndall, *Diamagnetism and Magne-crystallic action*, p. 130. London, 1870, et *Phil. Trans.*, 1855, p. 33.



Pl. XXVIII. — Electro-aimant de Tyndall pour l'étude du diamagnétisme.

le courant dans B était de sens tel que les bouts du barreau de fer W' étaient de même polarité que les pôles PP' , qui leur sont respectivement opposés, le barreau était repoussé ; lorsque le courant dans l'hélice était renversé, le barreau était attiré.

En substituant un barreau de bismuth au barreau de fer, on observa des effets exactement analogues, mais le sens du courant qui avait donné une attraction avec le fer donnait une répulsion avec le bismuth et inversement ; ce qui montre que le courant qui, en traversant l'hélice, produit dans le barreau de fer une polarité déterminée, produit une *polarité inverse* dans le bismuth. Les commutateurs R et R' permettaient d'essayer toutes les combinaisons de courants possibles.

La planche XXVIII est le dessin d'un appareil de bien plus grandes dimensions, destiné par le professeur Tyndall à montrer ces effets sur une grande échelle, pour des expériences de cours. On emploie quatre électro-aimants formant deux aimants en fer à cheval, et les courants sont dirigés de façon que chaque bout du barreau suspendu soit à la fois attiré par le pôle placé d'un côté et repoussé par le pôle situé de l'autre côté. Sur le dessin, on voit en avant le commutateur des électro-aimants : on ne voit pas celui de l'hélice, qui est derrière l'appareil.

Au moyen de cet appareil, le professeur Tyndall a réussi à produire, avec un cylindre de bismuth de $35^{\circ},5$ de long et de $2^{\circ},54$ de diamètre, des déviations assez distinctes pour être vues d'un nombreux auditoire.

En 1852, le professeur Weber publia un mémoire (1)

(1) Taylor, *Scientific Memoirs* (*Nat. Phil.*, 1853, p. 163 ou *Pogg. Ann.*, LXXXVII, p. 145).

où il discutait quelques conséquences mathématiques de la polarité diamagnétique. Il montra que :

« *Le magnétisme de deux molécules de fer placées sur la ligne d'aimantation s'accroît par leur action réciproque ; celui de deux molécules de bismuth placées dans cette direction diminue au contraire par leur action réciproque.*

» Dans les deux cas, c'est l'inverse qui se produit si les deux molécules sont sur une ligne perpendiculaire à la ligne d'aimantation.

» De là il résulte que, pour donner, au moyen d'une force magnétique déterminée, le magnétisme le plus énergique possible à une masse de fer déterminée, il faut transformer une masse de fer en un barreau aussi long et aussi mince que possible, et le placer de façon que sa longueur soit parallèle à la ligne de force magnétique ; et que pour donner le diamagnétisme maximum à une masse déterminée de bismuth, il faut la mettre sous forme d'une lame aussi mince que possible, et la placer de façon que son épaisseur soit parallèle à la ligne de force magnétique. »

Le professeur Weber décrit ensuite quelques expériences au moyen desquelles il a établi l'existence de la polarité diamagnétique par une méthode entièrement différente de celle du professeur Tyndall.

En 1856, le professeur Tyndall publia une série d'expériences faites par la méthode de Weber, et avec un appareil que Weber avait combiné pour lui. Comme le principe de ces expériences est le même que celui de Weber, et que de nombreux perfectionnements de détail ont été introduits par les professeurs Weber et Tyndall dans leurs nouvelles recherches, nous ne décrivons que le dernier appareil.

Voici comment s'exprime le professeur Tyndall (1) :

« La figure 194 est un croquis de l'instrument employé. BO, B'O' sont les contours d'une boîte rectangulaire, dont

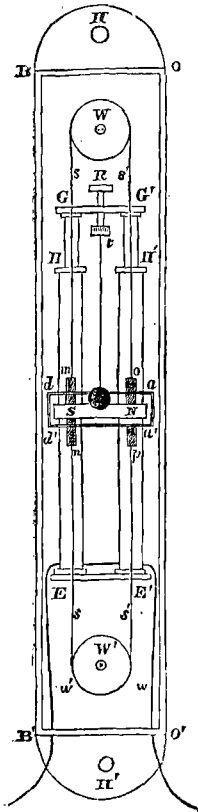


FIG. 194.

on a enlevé le devant pour laisser voir l'appareil à l'intérieur. Le fond de la boîte se prolonge par deux appendices demi-circulaires, percés de trous II et II'. De forts boulons de laiton, scellés dans une maçonnerie solide, passent par ces trous : l'appareil est assujéti à ces boulons par des vis et des écrous, et se trouve ainsi supporté dans une position verticale, à l'abri de toutes les perturbations, sauf celles qui agissent sur les fondations de l'Institution Royale. Toutes les pièces que l'on voit sur la figure 194 sont fixées sur le derrière de la boîte et ne sont pas reliées à son devant, afin que celui-ci puisse être enlevé. W et W' sont deux poulies à gorge, en buis ; le mouvement peut être transmis de l'une à l'autre au moyen de la corde ss'. Deux cylindres mn, op, de la substance à examiner, sont attachés à cette corde : quelquefois les cylindres sont percés dans leur longueur, la corde passe par ce trou, et les cylindres reposent sur des nœuds de la corde. HE, II'E' sont deux hélices en fil de cuivre recouvert de soie, enroulé sur deux tubes de laiton dont les

(1) Tyndall, *Diamagnetism*, p. 158.

extrémités supérieures dépassent de H en G et de H' en G'. Le diamètre intérieur de chaque hélice est de 2 centimètres; le diamètre extérieur de 3,3 environ; la longueur de H à E est de 48 centimètres, et les axes des hélices sont écartés de 10 centimètres. Le diamètre des poulies W et W' est aussi de 10 centimètres. La traverse GG' est en laiton, et par son centre passe la vis R. A cette vis est suspendu par un faisceau de fils de soie un système astatique de deux aimants. Sur la figure 194, on voit en SN celui de devant. Une section de l'instrument à hauteur du système astatique est représentée à plus grande échelle sur la figure 195: on y voit la position des hélices entre les aimants. On remarquera que ce système astatique est horizontal, et non vertical comme dans le galvanomètre ordinaire. Le cercle noir, sur le devant de l'aimant SN (fig. 194), est un miroir dont on voit la section en M (fig. 195). Pour faire équilibre au poids de ce miroir et régler les aimants dans une position horizontale, une rondelle de laiton W peut être déplacée sur une vis jusqu'à ce que l'on ait atteint un point où son poids amène les deux aimants dans un même plan horizontal. Il y a un autre réglage qui permet de rapprocher ou d'écarter les aimants l'un de l'autre. On observe les mouvements de cet aimant complexe au moyen d'une échelle éloignée et d'une lunette, suivant la méthode employée pour le magnétomètre de Gauss (1). Le rectangle da, d'a' (fig. 194) est la section d'un amortisseur en cuivre, qui, à raison des courants électriques qui y sont induits

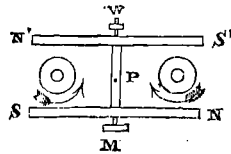


FIG. 195.

(1) Voir vol. I, p. 362.

par les mouvements de l'aimant le ramène rapidement au repos, ce qui accélère les expériences.

» On sait que l'un des bouts d'un aimant attire, que l'autre bout repousse le même pôle d'une aiguille aimantée, et qu'entre les deux bouts il y a un point neutre qui n'attire ni ne repousse. Le cas est le même pour les hélices HE et HE' , en sorte que si un courant les traverse pendant que l'aiguille astatique est exactement en face du point neutre, les hélices n'auront aucune action. Ce résultat est difficile à atteindre dans la pratique : il y a toujours une légère action résiduelle, qui attire les aimants contre les hélices ; mais on neutralise facilement cette action en disposant convenablement un circuit extérieur qui agisse sur les aimants en sens inverse de l'action résiduelle. Nous avons donc une paire d'hélices, qui, lorsqu'elles sont traversées par un courant, n'agissent pas sur les aimants, et qui, par suite, nous permettent d'examiner l'action vraie d'un corps susceptible de recevoir des propriétés magnétiques et placé à l'intérieur de ces hélices.

» Dans les expériences que l'on va décrire, on s'est toujours arrangé pour faire passer le courant en sens inverse dans les deux hélices ; en sorte que si les cylindres placés à l'intérieur deviennent polarisés, les extrémités supérieures de ces cylindres seront des pôles de noms contraires, et par suite les extrémités inférieures également.

» Supposons les deux cylindres mn , op , occupant la position centrale représentée à la figure 194 ; lors même que les cylindres deviendraient polarisés par l'action du courant qui les entoure, ils n'exerceraient aucune action sur les aimants astatiques, qui sont en regard des points neutres des cylindres.

» Mais supposons que la poulie W' tourne de manière à

amener les cylindres dans la position représentée par la figure 196; l'extrémité supérieure o de op et l'extrémité inférieure n de mn agiront simultanément sur les aimants suspendus. Pour la commodité de l'explication, supposons que les extrémités o et n soient toutes deux des pôles nord, et que la section (fig. 195) ait été prise pendant que les barreaux sont dans la position de la figure 196. Le pôle de droite o attirera S' et repoussera N , et cette attraction et cette répulsion s'ajoutent ensemble pour produire la déviation du système des aimants. D'autre part, le pôle de gauche n , étant aussi un pôle nord, attirera S et repoussera N' , et ces deux effets s'ajoutent aussi pour produire une déviation de même sens que les deux premiers. Ainsi, dans cet arrangement, non seulement l'action du magnétisme terrestre est annulée, mais encore la force agissante due à l'action réciproque des aimants et des corps placés à l'intérieur des hélices est quadruplée. En tournant la poulie dans l'autre sens, on amène les cylindres dans la position de la figure 197, et on peut ainsi étudier l'action des bouts m et p sur les aimants.

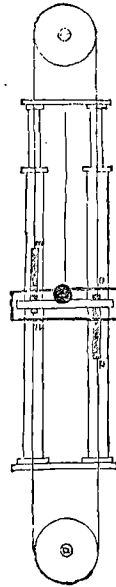


Fig. 196.

» La vis R (fig. 194) sert à soulever ou abaisser les aimants. Au bout t de la vis est un petit cercle de torsion que l'on peut faire tourner séparément, et au moyen duquel on peut tordre ou détordre le fil de suspension sans changer la hauteur des aimants.

» Le devant de la boîte est attaché par des crochets de cuivre : en face du miroir M est une petite fenêtre de verre à travers laquelle on fait les observations. Les aimants, à

l'intérieur de la boîte, sont ainsi protégés contre les perturbations de l'air extérieur. Le constructeur avait muni l'instrument d'un petit manche pour tourner la poulie W' ; mais j'en ai remplacé dans mes expériences par une clef fixée au bout d'une tige de 3 mètres de long ; avec cette tige dans la main droite, la lunette et l'échelle devant moi, j'étais complètement maître de l'expérience. Enfin, voici quelle était la marche du courant dans les hélices :

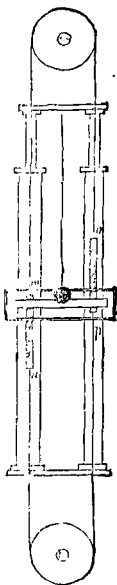


FIG. 197.

» Partant du pôle platine de la pile, il entrait par le fil w (fig. 194) qui traversait le fond de la boîte, passait dans la première hélice jusqu'en H' , revenait en E' , puis passait dans la deuxième hélice, revenait en E , d'où il rejoignait par le fil w' le pôle zinc de la pile.

» Un commutateur était introduit dans le circuit et permettait de renverser à volonté le sens du courant. »

On voit que cette méthode d'expérience a le grand avantage qu'on y observe toujours une déviation permanente, et que l'effet de courants d'induction est complètement éliminé. Nous citons quelques-uns des nombres du professeur Tyndall, pour permettre d'apprécier le caractère décisif de ses expériences. Les positions 1, 2 et 3 sont les positions des cylindres dans les figures 196, 194 et 197.

Les cylindres de bismuth avaient 7^e,62 de long, 1^e,8 de diamètre.

	Position 1.	Position 2.	Position 3.
Lecture de l'échelle.....	468	482	493

Cette série d'expériences a été répétée fréquemment avec

des résultats parfaitement uniformes. En renversant le courant de la pile, les résultats variaient en sens inverse, ce qui montre que : « La polarité des cylindres de bismuth dépend du sens du courant et change en même temps que lui. On a trouvé invariablement que, pour la même position des cylindres et le même sens du courant, la déviation produite était de sens inverse pour les corps paramagnétiques et diamagnétiques. »

Pour répondre aux objections qui attribuaient les effets observés aux courants induits dans les cylindres, le professeur Tyndall répéta ses expériences en employant des cylindres non conducteurs de l'électricité. Les nombres suivants ont été obtenus avec des tiges de verre lourd, longues de 7°,62, larges de 1°,52 et épaisses de 1°,27.

	Position 1.	Position 2.	Position 3.
Lecture de l'échelle.	664	662	660

Dans six séries différentes d'expériences faites sur cette substance, on obtint invariablement le même résultat. Dans tous les cas, les déviations observées étaient de même sens, que celles produites par le bismuth dans les mêmes circonstances. Les autres diamagnétiques solides qui furent observés sont l'antimoine, le spath calcaire, le marbre statuaire, le phosphore, le soufre, le salpêtre et la cire. Tous donnèrent des indices parfaitement distincts et irrécusables de polarité diamagnétique. Des cylindres de cuivre furent aussi mis en essai : cette substance est un très bon conducteur, mais un diamagnétique très faible. Si les effets observés avaient été dus à des courants induits dans les cylindres, la déviation produite par le cuivre aurait été environ 40 fois plus grande que celle produite par le bismuth. Or, en faisant l'expérience, les cylindres de cuivre

ont donné une déviation à peine sensible, fait qui, dans l'hypothèse de la polarité, s'explique aisément par leur très faible capacité diamagnétique.

POLARITÉ DES DIAMAGNÉTIQUES LIQUIDES

De l'eau et du sulfure de carbone contenus dans des tubes de verre mince ont été mis en expérience; et dans les deux cas on a observé distinctement une polarité diamagnétique.

EXPÉRIENCES FINALES

Une série correspondante d'expériences a été faite sur des paramagnétiques solides et liquides : dans tous les cas les déviations produites étaient de sens contraire à celles que donnaient les substances diamagnétiques.

Parmi les paramagnétiques examinés étaient des schistes de différentes espèces, du chlorure, du sulfate et du carbonate de fer en poudre, du cyanoferrure de potassium et du chlorure de cobalt. Dans le cas du chlorure de fer, l'action était si énergique que l'aiguille était projetée contre les hélices.

On termina par quelques expériences sur du bismuth réduit en poudre fine et exposé à l'air quelques jours, ce qui avait eu pour effet de couvrir chaque particule d'une couche d'oxyde. Une expérience faite au galvanomètre montra que cette poudre était complètement incapable de conduire le courant même d'une pile puissante. En remplissant de cette poudre deux tubes de verre et les plaçant dans l'instrument, on obtint une action presque aussi énergique, sinon aussi énergique, qu'avec les cylindres de bismuth solide.

ACTION DU MAGNÉTISME SUR LES CRISTAUX

Dans toutes les expériences décrites jusqu'ici, nous avons considéré le bismuth et les autres substances comme étant dans un état homogène. Mais quand elles sont dans un état hétérogène ou cristallin, Faraday a observé des différences considérables dans leur façon de se comporter sous l'action d'aimants puissants.

La loi générale qui détermine la conduite, dans le champ magnétique, des corps dont la densité n'est pas la même dans tous les sens, est que *l'axe magnétique induit dans le corps coïncide avec la ligne de plus grande densité.*

Dans les cristaux, cette ligne est parallèle aux plans de clivage ; c'est-à-dire qu'un cristal diamagnétique, suspendu entre les pôles d'un aimant, s'orientera avec ses plans de clivage dans la position équatoriale, lors même que le diamètre perpendiculaire aux plans de clivage serait notablement plus long que le diamètre mesuré suivant ce plan.

Si donc on découpe dans un cristal un barreau pas trop long, de telle sorte que les plans de clivage soient perpendiculaires à la longueur du barreau, ce barreau suspendu entre les pôles d'un aimant se comportera d'une façon opposée à celle d'un barreau homogène, de même forme, fait d'une substance ayant les mêmes propriétés magnétiques.

La raison en est que l'induction magnétique est bien plus forte parallèlement aux plans de clivage que perpendiculairement à ces plans ; en sorte que le couple tendant à mettre les plans de clivage dans la position équatoriale (si le cristal est diamagnétique) est plus fort que le couple tendant à mettre la longueur du barreau dans la position équatoriale, malgré que le bras de levier de ce dernier

couple soit plus grand. Toutefois, si la longueur du barreau est beaucoup plus grande que sa largeur, la différence des inductions magnétiques dans les deux directions ne pourra plus compenser la différence de longueur des bras de levier des deux couples. Dans ce cas, le barreau s'orientera comme une substance homogène, seulement il faudra moins de force pour l'écartier de sa position d'équilibre.

Les premières observations « sur la polarité cristalline du bismuth et d'autres corps » ont été faites par Faraday. Son mémoire sur ce sujet a fait le sujet de la Bakerian Lecture pour 1849, et se trouve dans les *Phil. Trans.* de cette année (1).

Le sujet a été repris par le professeur Tyndall, qui a réuni ses divers mémoires dans son *Diamagnetism and Magnetic Crystalline Action*.

Il a fait quelques expériences très intéressantes sur les effets de la compression, c'est-à-dire sur les effets de la production artificielle d'une « ligne de plus grande densité » dans une direction déterminée. La meilleure peut-être d'entre elles est due au hasard. Il faisait des expériences avec le grand électro-aimant de l'Université de Berlin, dont les hélices de cuivre seules pèsent 110 kilogrammes. Un cube de bismuth était suspendu entre les pôles; ceux-ci ayant été accidentellement trop rapprochés l'un de l'autre, leur attraction mutuelle l'emporta sur le frottement s'exerçant entre eux et leurs supports de fer. Ils se précipitèrent l'un sur l'autre, comprimant le bismuth et le réduisant aux trois quarts environ de sa première épaisseur. Les pôles ayant été séparés, le bismuth, retiré et lavé à l'acide chlorhydrique bouillant pour enlever les

(1) Et *Exp. Res.*, 2454, vol. III, p. 83.

traces de fer que les pôles pouvaient lui avoir communiquées, fut de nouveau suspendu entre eux. Aussitôt la ligne de plus grande compression s'orienta dans le sens équatorial.

On laissa alors à dessein les pôles se précipiter l'un contre l'autre et comprimer de nouveau le bismuth suivant une ligne perpendiculaire à la première ligne de compression. Après qu'on l'eut de nouveau nettoyé et suspendu, la nouvelle ligne de compression prit encore la direction équatoriale. On trouva, en répétant l'expérience, que l'on pouvait changer la direction de l'axe magnétique aussi souvent qu'on voulait.

Cette expérience est d'autant plus remarquable que le bismuth avait préalablement une structure cristalline naturelle ; mais la différence de densité dans les deux directions, due à la compression, était tellement supérieure à celle due à la direction des plans de clivage, que l'orientation était toujours déterminée par la direction de la compression artificielle.

Le professeur Tyndall a rempli plusieurs mémoires d'expériences faites pour confirmer et mettre en lumière la loi précédemment énoncée.

Une pâte faite de cire et de bismuth en poudre est une excellente matière pour faire des cristaux artificiels par compression. On peut aussi en faire avec de la mie de pain comprimée, pourvu que l'on ait soin de tenir bien propres les doigts et les outils.

Voici encore une expérience intéressante du professeur Tyndall, sur la construction d'un modèle destiné à montrer l'effet des plans de clivage. Le papier d'émeri est fortement paramagnétique. Faisons avec ce papier deux barreaux longs chacun de 2^c,54 (1 pouce) et larges de 1^c,27 ($\frac{1}{2}$ pouce).

L'un, que nous appellerons le n° 1, est fait en collant ensemble, avec de la gomme, assez de bandes de 2°,54 de long et de 1°,27 de large, pour faire une épaisseur de 1°,27 ($\frac{1}{2}$ pouce); l'autre, que nous appellerons le n° 2, en gommant ensemble un nombre suffisant de morceaux carrés chacun de 1°,27 de côté, pour faire un barreau de 2°,54 de long. En les suspendant entre les pôles d'un aimant, le n° 1, qui figure un cristal dont les plans de clivage sont parallèles à la longueur, s'oriente dans la direction axiale. Le n° 2, dans lequel les plans de clivage sont perpendiculaires à la longueur, s'oriente dans la direction équatoriale; c'est-à-dire avec son plan de clivage dans le sens axial, mais non sa longueur. La façon dont se comporte le n° 2, quand l'aimant est puissant, est frappante. L'attraction de la masse par le pôle le plus voisin est si énergique, qu'une fois, pendant que l'auteur répétait cette expérience, elle rompit un fort fil de soie à coudre, auquel le barreau était suspendu, et la longueur du barreau continua à être maintenue avec force dans la direction de la ligne équatoriale, l'action étant exactement celle d'un barreau homogène d'une substance fortement diamagnétique.

EFFET DU MILIEU ENVIRONNANT

On a reconnu que le milieu dans lequel se trouve la substance suspendue entre les pôles influe sur les résultats de l'expérience. Par exemple, un barreau homogène d'une substance faiblement paramagnétique s'oriente axialement dans le vide ou dans l'air; il prend au contraire l'orientation équatoriale si on le plonge dans une solution concentrée de sulfate de protoxyde de fer.

Une série d'expériences faites par Faraday et continuées

par Tyndall a donné de ce fait une explication simple et évidente. Pour que le corps suspendu puisse prendre une position quelconque, il faut qu'il déplace de cette position une quantité égale du milieu qui l'entoure ; mais la force magnétique agit à la fois sur le corps et sur le milieu. Si l'action sur la substance est plus forte que sur le milieu, la substance prendra la même position que si elle était dans le vide. Mais si, au contraire, l'action magnétique est plus forte sur le milieu que sur la substance, le milieu prend la position à laquelle tend à l'amener la force magnétique, et la substance est déplacée et prend la position contraire.

Quand ce fait eut été établi, Faraday suggéra l'idée qu'il serait possible de se rendre compte de tous les phénomènes de diamagnétisme sans admettre l'existence d'une répulsion proprement dite, mais en supposant tout l'espace rempli d'un milieu dont la capacité magnétique serait moindre que celle du fer, mais plus grande que celle du bismuth : on se rendrait compte alors des propriétés diamagnétiques que l'on attribue au bismuth en le considérant comme un paramagnétique plus faible que le milieu.

Le professeur Tyndall (1), dans une lettre à Faraday, a fait remarquer que cette explication ne suffit pas pour rendre compte des faits observés, et qu'en particulier les conclusions que l'on tire relativement à l'action du magnétisme sur les cristaux sont en contradiction flagrante avec les résultats de l'expérience. Les arguments en faveur de l'existence effective d'une répulsion diamagnétique ne sont pas affaiblis par l'examen des phénomènes auxquels donnent lieu, sous l'action des forces magnétiques, les corps entourés d'un milieu.

(1) *Diamagnetism*, p. 213.

CHAPITRE XXXII

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES LIGNES ET DES SURFACES ÉQUIPOTENTIELLES ET DES LIGNES DE FLUX

EXPÉRIENCES DU PROFESSEUR W. G. ADAMS (1)
(pl. XXIX, XXX, XXXI)

Le professeur Adams a réussi à obtenir expérimentalement un tracé des courbes équipotentiellles dans des conducteurs traversés par un courant.

L'utilité de cette recherche résulte de ce que les formes des courbes équipotentiellles peuvent être déduites comme conséquences mathématiques de la théorie de la distribution électrique; la concordance ou le désaccord des résultats expérimentaux avec les résultats théoriques devait donc fournir un moyen de vérifier l'exactitude de la théorie.

La théorie générale des expériences repose sur ce fait, que si on relie les deux électrodes d'un galvanomètre à divers points d'un conducteur situés sur la même surface équipotentielle, l'aiguille du galvanomètre ne devra pas dévier, si énérgique que soit le courant qui traverse le conducteur.

La méthode employée pour le tracé consistait à faire passer un courant entre deux points, soit dans un liquide, soit dans une feuille d'étain; puis, ayant placé une des

(1) Voir *Bakerian Lecture, Proc. Roy. Soc.*, XXIV, 1875-76, p. 1.

électrodes du galvanomètre en un point du conducteur, à déterminer un certain nombre de points tels qu'en y plaçant l'autre électrode, on n'observe aucune déviation. Tous ces points font alors partie de la même ligne ou surface équipotentielle passant par le premier point. Avec un galvanomètre à réflexion sensible, il suffit de déplacer l'électrode de 1 millimètre de la position convenable pour avoir une déviation marquée du point lumineux. Le professeur Adams donne de ses expériences la description suivante :

« Pour tracer les courbes, une des électrodes du galvanomètre à réflexion de Thomson était attachée à une petite vis ou à une pointe qui établit un contact fixe avec le disque de feuille d'étain, ou qui traverse ce disque ; l'autre électrode du galvanomètre était attachée à un petit tube de même calibre que la vis, et le bout de ce petit tube était mis successivement en contact avec les divers points du disque. Au centre de ce petit tube se trouvait une aiguille retenue par un ressort ; quand on était sur le point voulu, en appuyant sur le ressort on perceait un trou sur la feuille d'étain et l'on marquait ainsi la position de l'électrode traçante. »

La figure 198 représente un arrangement d'électrodes employé par l'auteur pour répéter les expériences du professeur Adams.

La meilleure forme de contact est probablement celle qui est obtenue avec des pointes d'aiguille sur lesquelles on soude des rondelles métalliques de 2 ou 3 millimètres de diamètre, que l'on presse fortement sur la feuille d'étain. En plaçant une feuille de papier sous le disque de feuille d'étain, la forme des courbes équipotentielles se trouve piquée du même coup et on peut ensuite la dessiner. Pour les démonstrations de cours, on peut placer la feuille

d'étain en face d'une lampe, et projeter sur un écran les formes des courbes équipotentielles ou des lignes de flux. Si les courbes sont tracées sur un disque circulaire de mêmes dimensions ou de dimensions plus petites que celles

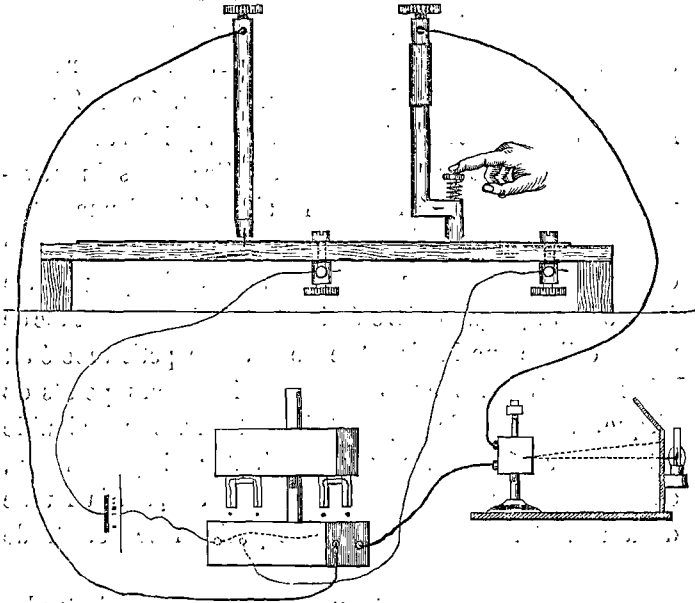


FIG. 198.

de la lentille convergente, toute la série de courbes équipotentielles peut être projetée à la fois sur l'écran.

« 1^{re} Cas. — La planche XXIX (fig. 1) représente une feuille d'étain formant un carré de 310 millimètres de côté, où les pôles A et B de la pile sont à 126 millimètres l'un de l'autre; la ligne AB est sensiblement parallèle à un des côtés et passe par le centre O du carré; le point O est équidistant des deux pôles.

» Non loin du centre de la feuille, et, pour les plus

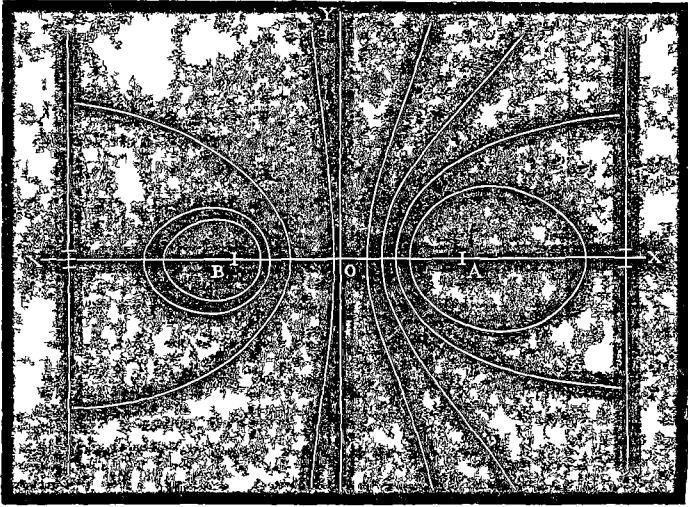


FIG. 1.

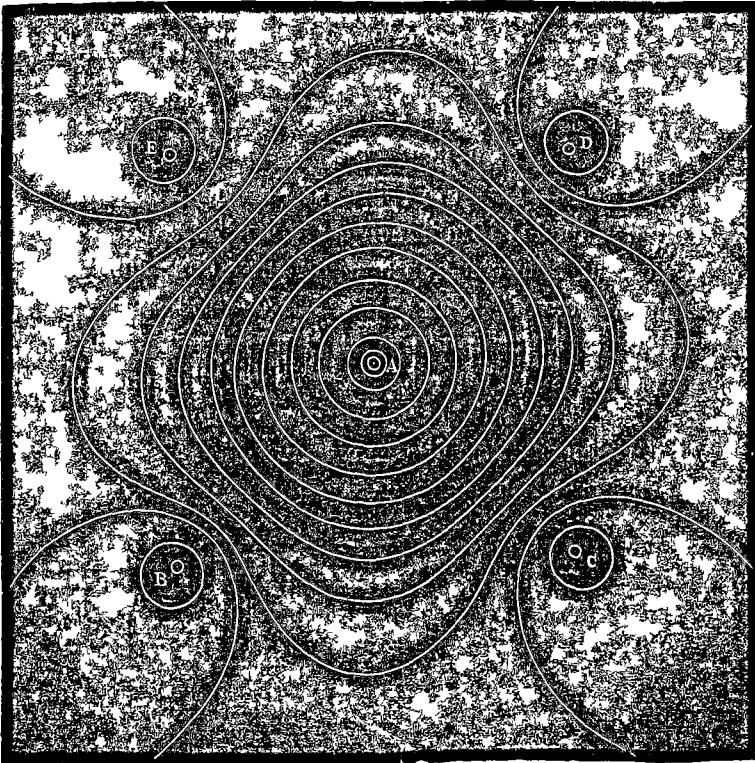


FIG. 2.

PL. XXIX. — Lignes équipotentielles.

petites courbes, dans la partie comprise sous un angle variant de 60° à 90° autour des électrodes, ces courbes coïncident avec des cercles ; dans leurs autres parties, quand on tient compte de l'influence des bords, ces courbes concordent d'une façon remarquable avec celles que donne la théorie.

» Si l'on prend une grande feuille d'étain, et si les électrodes de la pile sont placées loin des bords de la feuille, alors, pour tous les points qui ne sont pas près des bords, les formes des courbes équipotentiellles sont très rapprochées de celles qui correspondent à une feuille de dimensions infinies.

» Dans tous les cas de ce genre, quand il n'y a que deux électrodes de pile en communication avec la feuille, les courbes équipotentiellles sont des cercles ayant leurs centres sur la ligne droite passant par les deux électrodes ; et les lignes de flux sont aussi des arcs de cercle passant par les deux pôles.

» 2^e Cas. — La figure 199 représente une feuille circulaire d'étain, de 210 millimètres de diamètre, avec les électrodes sur la circonférence et distantes l'une de l'autre d'une longueur égale au rayon. Les électrodes étaient de petites vis d'attache placées aussi près que possible des bords du disque. Les différences de potentiel entre deux courbes équipotentiellles successives ont été mesurées par les déviations de l'aiguille du galvanomètre.

» Les déviations étaient les suivantes :

De k à a	150
— a à b	50
— b à c	50
— c à e	50
— e à f	50
— f à g	50
— g à h	80

» On voit que la chute de potentiel de k à d est plus grande que la chute de potentiel de d à h . Cette différence peut provenir d'une différence dans les résistances des contacts avec l'électrode de la pile.

» Les rayons des cercles sont : 28, 56, 290, 82, 28 et 12 millimètres en partant du point k ; et les distances entre les circonférences mesurées le long de la ligne joi-

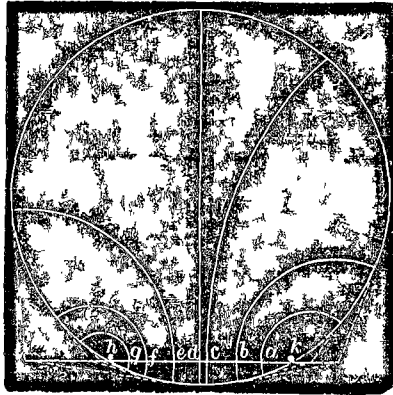


FIG. 199.

gnant les deux électrodes sont : 20, 13, 15, 19, 15, 10 et 12 millimètres.

» Les distances 13, 15, 19, 15 et 10 correspondent à des différences égales de potentiel, et par suite les résistances des portions du disque comprises entre ces courbes équipotentielles consécutives sont égales entre elles. Dans cette expérience, il y avait une grande résistance entre la vis d'attache et le disque de feuille d'étain au point de contact; mais cette circonstance ne pouvait pas altérer les formes des courbes équipotentielles.

» 3^e Cas. — La planche XXIX fig. 2 représente une grande feuille carrée d'étain de 45,72 centimètres de côté,

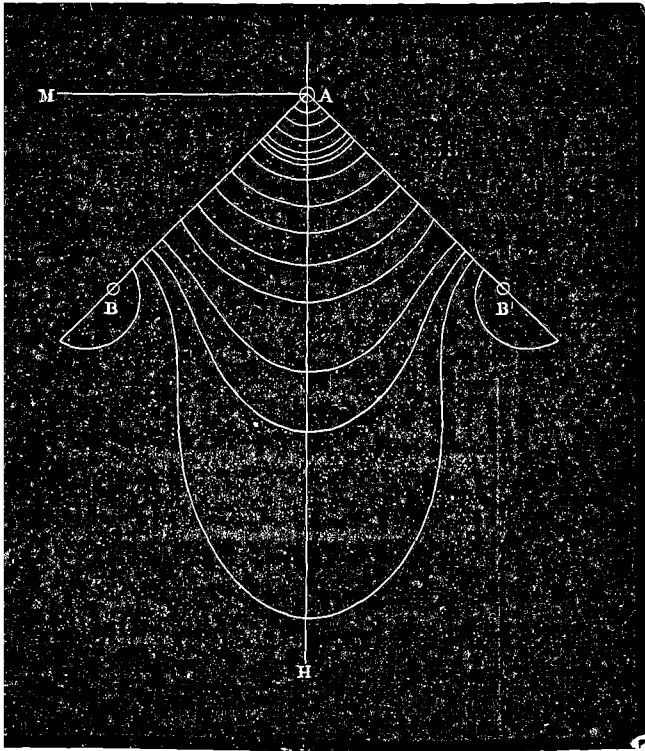


FIG. 1.

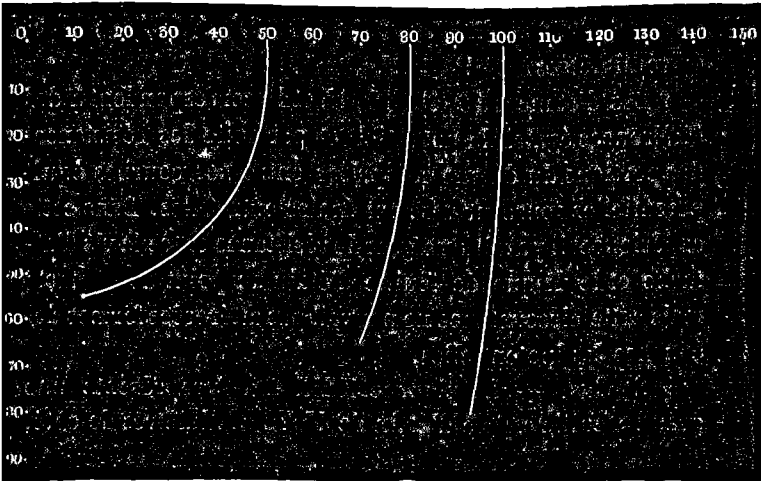


FIG. 2.

Pl. XXX. - Lignes équipotielles.

avec une électrode au centre, par laquelle le courant entrait dans la feuille, et quatre électrodes semblables aux quatre angles d'un carré, chacune à 76 millimètres de l'électrode centrale, par où le courant sortait de la feuille. Les électrodes étaient des aiguilles auxquelles étaient soudées des rondelles de laiton de 3 millimètres de diamètre.

» Les quatre électrodes négatives étaient réunies ensemble, au-dessous de la tablette sur laquelle était placée la feuille d'étain, par des bandes de cuivre vissées aux électrodes par un petit écrou sous chaque aiguille. Les aiguilles qui traversaient la feuille d'étain étaient munies de rondelles qui pressaient fortement de haut en bas sur la feuille de manière à assurer un bon contact. On se servait de deux éléments Grove, et la différence de potentiel entre deux courbes successives donnait une déviation de 50 divisions de l'échelle. Les résistances des portions du disque comprises entre deux courbes équipotentielles successives sont égales entre elles.

» 4^e Cas. — Les courbes de la planche XXX (fig. 4) comprises dans le demi-quadrant BAI sont les courbes équipotentielles obtenues quand une électrode positive A est à l'angle d'une feuille carrée d'étain dont AI et AM sont les bords et qu'on place une électrode négative en B, à une distance de 76 millimètres de A, sur la bissectrice AB de l'angle des deux bords. Les courbes comprises entre les lignes AB et AM n'ont pas été dessinées sur la figure.

» Les courbes, sauf deux exceptions, sont tracées à des distances qui correspondent à des différences égales de potentiel : en faisant abstraction des courbes interpolées, les résistances des portions de la feuille comprises entre deux courbes équipotentielles consécutives sont égales entre elles.

» Cette figure représente aussi les courbes équipotentiellles pour une feuille carrée BAB', dont AB et AB' sont les bords, avec une électrode positive en A, et deux électrodes négatives en B et B', sur les bords de la feuille.

» On peut également regarder le cas où l'on a une électrode positive au centre et quatre électrodes négatives aux angles d'un carré, comme équivalent à la réunion de deux systèmes, consistant chacun en une électrode positive et deux électrodes négatives placées de chaque côté et à égale distance de la positive sur la même ligne droite, dans une feuille soit indéfinie, soit limitée par cette ligne droite.

» 5^e Cas. — Les courbes qui correspondent à cette distribution d'électrodes sont dessinées dans la planche XXXI fig. 4; la distance de l'électrode positive à chaque électrode négative est de 76 millimètres, comme dans les cas 3 et 4, les électrodes étant disposées dans la partie centrale d'une très grande feuille d'étain.

» Considérant la courbe qui coupe l'axe à la distance de 54 millimètres du centre et celles qui coupent l'axe à des distances de 1 millimètre de chaque côté de celle-ci, les distances r_1, r_1' de divers points de l'une des courbes aux électrodes négatives diffèrent des quantités $r_1 - r_1'$ inscrites dans le tableau suivant :

VALEURS DE $(r_1 - r_1')$			
Pour la courbe à 53 millimètres.	Pour la courbe à 53 ^{mm} ,75.	Pour la courbe à 54 millimètres.	Pour la courbe à 55 millimètres.
106	108	109	110
105	109	109	110
104	108	110	110
104	108	109	110
104	108	112	110
101	108	114	110
99			
97			

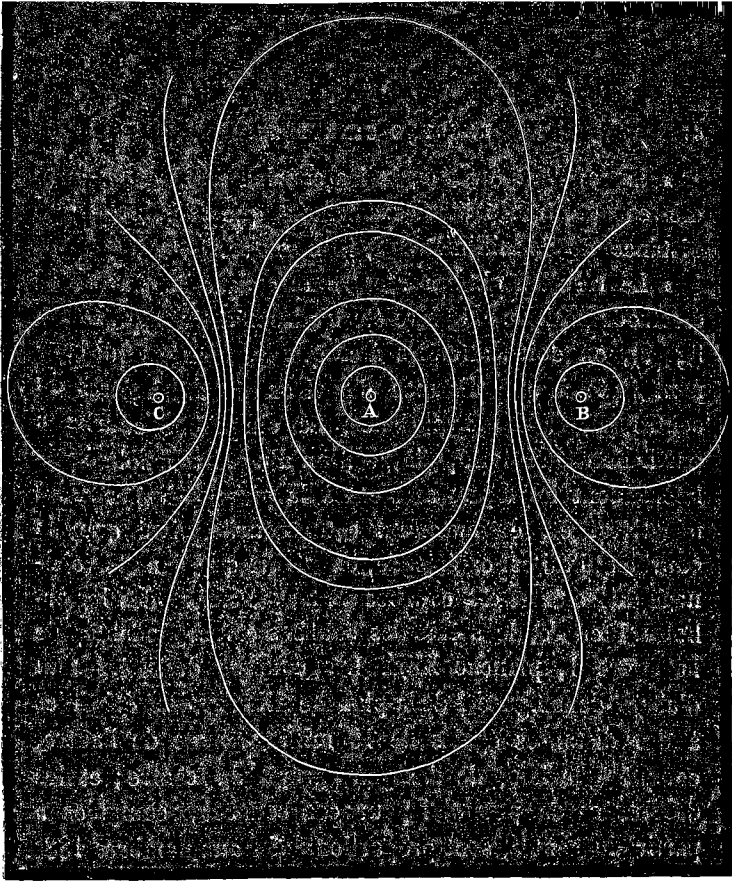


FIG. 4.

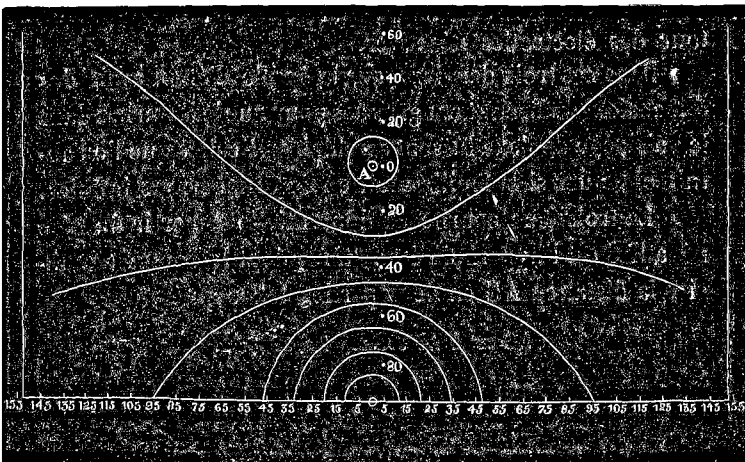


FIG. 2.

PL. XXXI. — Lignes équipotentiellles.

» La courbe figurée entre les courbes à 53 et 54 millimètres a été tracée aussi exactement que possible à une distance de 53 millimètres $\frac{3}{4}$ du centre.

» Le résultat obtenu montre que dans le cas d'une électrode positive et quatre électrodes négatives (pl. XXIX, fig. 2), on doit s'attendre à ce que les courbes qui coupent l'axe à une distance d'environ 54 millimètres du centre soient des hyperboles. La cinquième courbe à partir du centre occupe la position d'une hyperbole équilatère dont les foyers seraient à la place des électrodes négatives, et, en mesurant cette courbe ainsi que la courbe qui lui est extérieure, on vérifie que dans le voisinage du sommet ces courbes sont exactement des hyperboles. Il en est de même des courbes correspondantes de la figure 1, planche XXX. Les courbes dessinées tout d'abord dans figure 1 de la planche XXXI avaient été tirées à des distances égales de 10 millims. l'une de l'autre, comptées le long de l'axe en partant du centre; et les différences de potentiel pour ces courbes, comptées à partir du centre, sont proportionnelles aux nombres 138, 85, 88, 100, 80. Dans le nombre 138 est compris l'effet dû au contact de l'électrode. On intercale ensuite d'autres courbes dans le voisinage de l'hyperbole équilatère et autour des électrodes négatives.

» Dans ces trois derniers cas, la feuille d'étain avait des dimensions suffisamment grandes pour que les courbes dans le voisinage de l'axe fussent semblables à celles que l'on aurait obtenues si la feuille avait eu des dimensions infinies.

» La troisième courbe équipotentielle à partir du pôle négatif C est l'hyperbole équilatère, dont le sommet O divise la distance AC en deux parties telles que

$$AO \text{ est à } AB \text{ comme } 1 \text{ est à } \sqrt{2}.$$

» AO est égal à 53,75 millimètres.

» 6° Cas. — La figure 200 représente le cas d'un disque circulaire, dans lequel le courant pénètre par le bord et sort par le centre du disque.

» A l'entour du centre, les courbes sont à très peu près

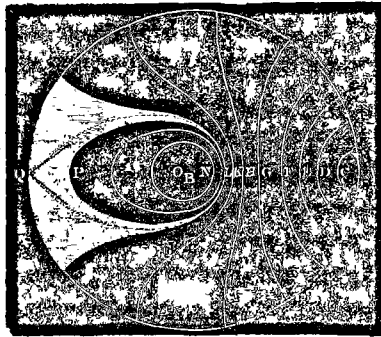


FIG. 200.

des ellipses de faible excentricité et ayant un foyer au centre du disque (1).

» Lorsque l'électrode galvanométrique fixe est placée en L, il est difficile de trouver une succession de points formant une courbe équipotentielle continue; l'électrode traçante peut être placée à un moment sur la limite de la portion ombrée de la figure, et à un autre moment sur l'axe dans le voisinage du point Q, sans que le galvanomètre soit traversé par un courant.

» En plaçant l'électrode galvanométrique fixe en Q, l'é-

(1) a étant le rayon du disque, r la distance du centre, l'excentricité est $\frac{2r}{a}$.

La courbe qui coupe l'axe au point L, à une distance de 16 millimètres, c'est-à-dire $(3 - 2\sqrt{2})a$ du centre, a deux branches qui se coupent l'une l'autre à angle droit au point Q, chacune d'elles coupant le bord du disque sous un angle de 45° , le rayon du disque étant de 95 millimètres.

lectrode traçante dessine dans le voisinage de ce point deux lignes droites de même potentiel que le point Q, chacune de ces lignes coupant le bord du disque en ce point sous un angle de 45° . L'incertitude du tracé de cette ligne équipotentielle s'explique par ce fait que chacune des électrodes du galvanomètre avait un diamètre d'un peu plus de 1 millimètre.

» Les courbes équipotentielles situées plus loin du centre coupent le bord du disque à angles droits.

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES LIGNES DE FLUX ET DES SURFACES ÉQUIPOTENTIELLES DANS L'ESPACE A TROIS DIMENSIONS.

» Si deux fils de platine, scellés dans des tubes de verre, et dont un petit bout seulement fait saillie au dehors de l'extrémité scellée, sont plongés dans un liquide, les autres extrémités étant reliées aux pôles d'une pile, on réalisera d'une façon très approchée le cas de courants s'écoulant d'un point à un autre à l'intérieur d'un liquide; et au moyen de deux autres fils de platine semblablement disposés, mais reliés à un galvanomètre, on pourra tracer les formes des surfaces équipotentielles dans le liquide. En employant de l'acide sulfurique dilué, on aura de la polarisation sur les électrodes; mais, en faisant passer le courant alternativement dans les deux sens et n'établissant que des contacts très courts, on n'aura sur les électrodes du galvanomètre qu'une faible polarisation, pourvu que ces électrodes ne soient pas beaucoup écartées de la même surface équipotentielle.

» Après quelques essais préliminaires pour déterminer jusqu'à quel point cette méthode était pratique, j'ai commencé en mars 1872 une série définie d'expériences. Pour

opérer dans l'acide sulfurique dilué, dans le sulfate de cuivre et dans le sulfate de zinc, j'ai employé une caisse rectangulaire en bois de 304 millimètres de long, 200 de large et 200 de profondeur. Sur les bords de la caisse sont collées des bandes de papier graduées en millimètres : on entaille les bords des parois vers les milieux des deux petits côtés, et on y fixe une pièce à coulisse pour supporter les électrodes de la pile. Ces pièces à coulisse sont susceptibles de glisser parallèlement aux grands côtés de la caisse,

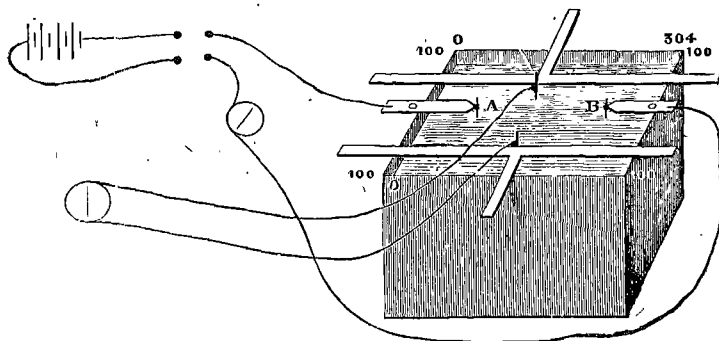


FIG. 120.

et permettent de placer les électrodes de la pile à différentes distances l'une de l'autre (fig. 201). Les électrodes du galvanomètre étaient solidement fixées dans des tubes de laiton que l'on plaçait sur des pièces de bois en forme de T, en ayant bien soin de les aligner avec l'intersection des deux arêtes du T, et de les avoir verticaux quand les T reposaient sur les bords de la caisse. On pouvait lire ainsi sur les bords de la caisse les coordonnées rectangulaires du point.

» Dans les premières expériences, on prenait les points

à une profondeur de 10 centimètres au-dessous de la surface du liquide, la caisse étant à peu près pleine. On opérait avec des courants inversés et on notait les déviations du galvanomètre des deux côtés du zéro pour chaque position des électrodes. La pile se composait de 20 éléments Leclanché, ayant chacun une résistance intérieure d'environ 3 ohms et une force électro-motrice d'environ 1 Daniell $1/2$. L'intensité du courant était mesurée avec un galvanomètre des tangentes, de la forme du double galvanomètre d'Helmholtz; la déviation des aiguilles était généralement de 46° . Les électrodes du galvanomètre pouvaient être amenées à 1 centimètre du centre de la caisse.

» Après une série préliminaire d'expériences pour déterminer et éliminer les effets des courants de polarisation produits par l'action du liquide électrisé autour des électrodes du galvanomètre, on traçait les surfaces équipotentielles à trois dimensions. On reconnut que le plan équidistant des électrodes était une surface équipotentielle, savoir celle au potentiel zéro.

» 7^e Cas. — La planche XXX, fig. 2, représente trois sections de trois surfaces équipotentielles, l'une passant par le point (50,10), l'autre par le point (80,10) et la troisième par le point (100,10); les électrodes de la pile étant placées à 10 millims. de distance des petits côtés de la caisse, et à 284 millims. l'une de l'autre.

» Lorsque les électrodes de la pile sont aussi rapprochées des parois de la caisse, la distribution des courants électriques, et par suite la forme des surfaces équipotentielles, ne sera pas la même que dans un conducteur illimité dans tous les sens; par conséquent, en comparant les résultats de l'expérience avec ceux de la théorie, il faut tenir compte de l'effet des bords de la caisse. »

Remarquons que la ligne O-150 de la planche XXX, fig. 2, est la ligne A B de la figure 201.

EXPÉRIENCES AVEC DES ÉLECTRODES LINÉAIRES

« 10° Cas. — La caisse rectangulaire servait aussi à déterminer les formes des surfaces équipotentiellles cylindriques, quand les électrodes sont des tiges droites et qui s'étendent dans toute la profondeur du liquide. Le liquide était du sulfate de zinc, et on avait pour électrodes des tiges de zinc amalgamé. La planche XXXI, fig. 2, représente les sections des surfaces équipotentiellles obtenues, quand une des électrodes de la pile est au centre A de la caisse, et l'autre au milieu B de l'un des côtés. Ces électrodes étaient distantes l'une de l'autre de 100 millims. On ne pouvait pas placer les électrodes du galvanomètre à une distance de l'axe des courbes inférieure à 5 millims. Les courbes dessinées représentent les sections des surfaces équipotentiellles cylindriques, qui sont à des distances de 10 millims. comptées sur une ligne parallèle à l'axe et menée à 5 millims. de cet axe.

» On a aussi reproduit le cas d'un cylindre circulaire contenant du sulfate de cuivre, avec les deux électrodes de pile aux deux bouts d'un diamètre. Les surfaces équipotentiellles sont alors des cylindres circulaires coupant à angles droits les parois de la caisse. On a essayé d'employer le mercure pour ces expériences, mais en raison de sa conductibilité presque parfaite, il était très difficile de déterminer dans cette substance deux lignes verticales qui eussent exactement le même potentiel.

» 11° Cas. — L'expérience a été faite également avec des électrodes linéaires dans du sulfate de zinc. Une électrode positive était placée au milieu d'un des bords de

la caisse rectangulaire; deux électrodes négatives étaient disposées symétriquement à la même distance de l'électrode positive, et de façon que les lignes joignant l'électrode positive aux deux électrodes négatives fussent perpendiculaires l'une à l'autre. Ce cas correspond à celui qui est dessiné dans la figure 1 de la planche XXX, et les sections des surfaces, aux points suffisamment éloignés des parois de la caisse, sont semblables aux courbes de la planche XXIX (fig. 2) ou de la planche XXX (fig. 1). Les formes de ces courbes ayant été préalablement déterminées dans les expériences avec les feuilles d'étain, il était très facile de faire mouvoir l'électrode traçante d'un point à un autre sur la même courbe équipotentielle, en se servant des courbes déjà dessinées pour guider l'électrode. »

LIGNES DE FLUX

« La théorie démontre que les lignes de flux coupent à angles droits les surfaces équipotentielles. On dessinera donc facilement les lignes de flux; mais comme l'électricité ne peut pas couper une ligne de flux, ou, en d'autres termes, comme il n'y a pas de courant le long d'une ligne équipotentielle, il en résulte que si d'une feuille de dimensions infinies on détache une portion limitée par des lignes de flux, on ne changera rien dans la distribution électrique. C'est ce qu'on vérifiait en effet, comme on peut le voir en comparant la figure 1 de la planche XXX et la figure 2 de la planche XXIX; dans la planche XXX, on a détaché un quart de la feuille suivant les lignes de flux joignant les électrodes A B, A B'. En calculant l'équation des lignes de flux, on trouve que ces lignes sont des arcs de cercle passant par les électrodes de la pile. La comparaison de ce résultat avec la figure 1 de la planche XXIX

montre la concordance qui existe entre la théorie et l'expérience; car une série de cercles ayant leurs centres sur la ligne YOY' et passant par les points AB coupera toutes les courbes à angles droits. Il est évident que la ligne droite XX est un arc de cercle dont le centre est situé sur OY à une distance infinie du point O.

» On a calculé la variation qu'éprouvent dans le voisinage des bords, quand ces bords ne coïncident pas avec une ligne de flux, les courbes calculées pour le cas d'une feuille indéfinie, et les résultats obtenus ont été d'accord avec ceux de l'expérience. Cet accord a été aussi constaté pour les effets obtenus en faisant varier la profondeur des électrodes du galvanomètre dans le liquide.

» Les courbes équipotentiellles du 10° cas, avec des électrodes linéaires dans le liquide, sont théoriquement les mêmes que celles du 5° cas, où l'on a comme électrodes des pointes enfoncées dans une feuille d'étain. On voit la concordance en comparant les figures 1 et 2 de la planche XXXI qui résultent de l'expérience. Cette concordance peut être regardée comme une preuve indépendante de l'exactitude de la théorie de la distribution électrique : elle vérifie que la conduction d'un courant dans un électrolyte ressemble à celle d'un courant dans un conducteur métallique, pour tout ce qui concerne les lignes de flux. »

CHAPITRE XXXIII

LA BOBINE D'INDUCTION

Nous avons vu au chapitre XXII que, si un aimant placé à l'intérieur d'une bobine de fil métallique en est retiré subitement, il se produit dans la bobine un courant électrique instantané dont la force électro-motrice est d'autant plus grande que l'aimant a été retiré plus brusquement.

Si, au lieu d'enlever l'aimant, on détruit son magnétisme, on trouve, comme il fallait s'y attendre, qu'il y a un courant induit dans la bobine. Si au lieu d'un aimant d'acier on emploie un électro-aimant, on peut, en émettant et en arrêtant le courant, produire et détruire le magnétisme bien plus soudainement qu'en introduisant ou retirant un barreau d'acier ; ainsi, en détruisant le magnétisme, on induit dans la bobine qui entoure l'électro-aimant un courant de force électro-motrice bien plus grande que celle qu'on pourrait produire en retirant un aimant d'égale force.

La bobine d'induction est un instrument dans lequel on utilise le phénomène de l'induction électro-magnétique pour transformer l'électricité du courant de la pile voltaïque, qui a des effets chimiques, calorifiques et magnétiques considérables, mais dont la différence des potentiels aux différents points est relativement faible, en une électricité dont le pouvoir chimique ou magnétique est bien moindre, mais dont la différence des potentiels aux différents points du circuit est énorme.

Pour avoir quelque idée de la différence entre les forces électro-motrices que donne une pile par l'intermédiaire d'une bobine d'induction et celles fournies directement par les plus fortes piles, nous rappellerons que MM. De la Rue, Müller et Spottiswoode (1) ont trouvé qu'avec 1080 éléments au chlorure d'argent on ne pouvait obtenir qu'une étincelle dont la longueur variait de $\frac{1}{263}$ de pouce ($0^{\text{mm}},096$) à $\frac{1}{250}$ ($0^{\text{mm}},1$), tandis que de petites bobines d'induction donnent des étincelles de plus d'un pouce ($25^{\text{mm}},4$), avec un ou deux éléments, et que la grande bobine de M. Spottiswoode, décrite plus loin, donne avec 50 éléments Bunsen une étincelle de 42 pouces $1/2$ ou plus d'un mètre.

La bobine d'induction se compose essentiellement d'un électro-aimant placé à l'intérieur d'une bobine de fil fin, et d'un appareil pour produire et détruire le magnétisme aussi rapidement qu'on le désire.

Voici les traits généraux de sa construction. Un noyau de fer doux est couvert d'une couche de matière isolante ; autour sont enroulées en forme d'hélices quelques couches de gros fil isolé. Cette hélice est appelée le *circuit primaire*. Sur le circuit primaire, et bien isolée de lui par un tube épais d'ébonite, est enroulée une grande longueur de fil fin, formant un grand nombre de couches dont chacune comprend un grand nombre de tours. Le fil fin est appelé le *circuit secondaire*.

Le *noyau* de fer doux est généralement formé d'un faisceau de fils de fer qui perdent leur aimantation plus vite qu'une tige massive.

Les extrémités du circuit primaire sont reliées à la pile ; celles du circuit secondaire, à des pointes de décharge

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. XXIII, 1875, p. 357.

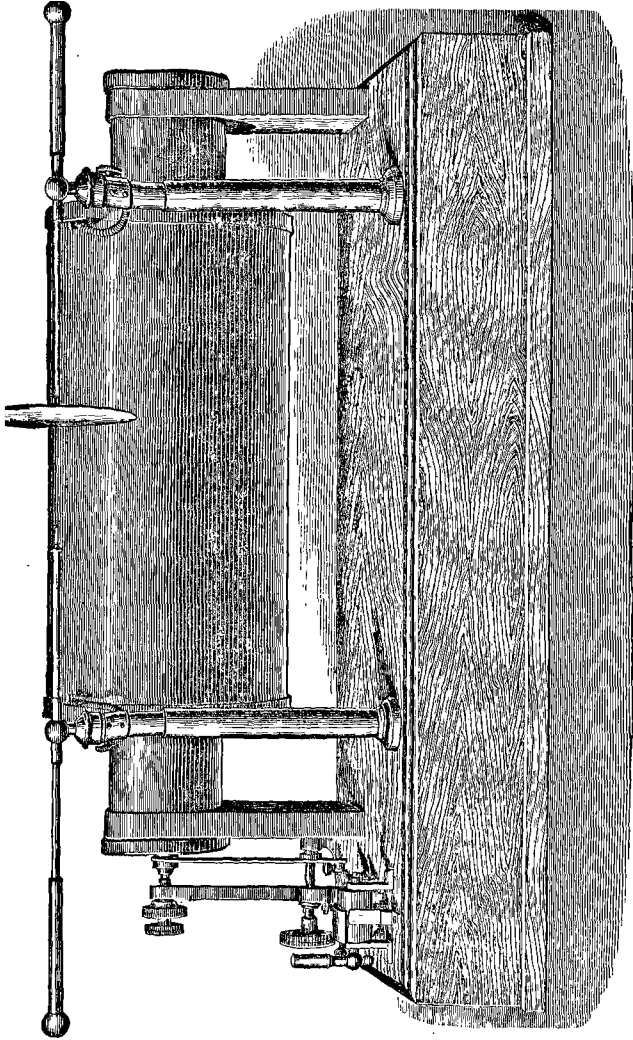
séparées par un intervalle d'air plus ou moins grand. Chaque fois que le courant est établi ou rompu dans le circuit primaire, il s'établit par induction une certaine différence de potentiel le long de chacune des parties du circuit secondaire, chaque tour de fil étant sous l'influence du noyau de fer et des portions du circuit primaire les plus voisines.

Le nombre de tours de fils du circuit secondaire est très grand, et dans chaque tour s'établit une différence de potentiel propre. Toutes ces différences, s'ajoutant ensemble, produisent entre les pointes de décharge une différence de potentiel très grande, qui devient suffisante pour vaincre la résistance de la couche d'air comprise entre ces pointes.

La planche XXXII représente une bobine, construite par Apps et appartenant à l'auteur, qui donne dans l'air une étincelle de 17 pouces (43 centimètres), et dont le fil secondaire a 35 kilomètres de long.

Il est indispensable que le contact soit rompu aussi soudainement que possible, afin que les différences de potentiel développées aux différents points du circuit secondaire puissent agir toutes à la fois pour produire une grande différence de potentiel aux extrémités.

On a reconnu que, sauf dans les très grandes bobines, les étincelles ne se produisent qu'à la rupture du circuit, et même, dans les très grandes bobines, l'étincelle de fermeture est bien plus faible que celle de rupture. Ce fait peut tenir à ce qu'il faut plus de temps à l'aimantation du noyau de fer pour atteindre son maximum que pour tomber de son maximum à zéro. Dans tous les cas, en séparant par un intervalle suffisant les deux extrémités du fil induit, le courant direct franchira seul l'interruption, de sorte que l'une des extrémités du fil donnera seule de



Pl. XXXII. — Bobine d'induction de 17 pouces (0^m 43).

l'électricité positive, et l'autre de l'électricité négative : ce seront les deux *pôles* de la bobine.

LE CONDENSATEUR

C'est une partie très importante d'une bobine d'induction : il est formé d'un certain nombre de feuilles d'étain séparées par du mica, de la gutta-percha ou du papier paraffiné. Les première, deuxième, troisième, cinquième, septième, etc. feuilles sont reliées à un des bouts du fil primaire; les deuxième, quatrième, sixième, huitième, etc., à l'autre bout. Quand le courant est interrompu, l'extra-courant de rupture, induit dans le fil primaire, est de même sens que le courant primaire, et, par suite, tend à prolonger l'aimantation du noyau (1). Quand on emploie un condensateur, l'extra-courant se répand dans le condensateur et le charge. Puis le condensateur, se déchargeant de lui-même instantanément, envoie autour de la bobine un courant de sens inverse qui en détruit aussitôt l'aimantation. Généralement le condensateur est placé dans le socle de la bobine.

INTERRUPTEURS (OU RHÉOTOMES) — LA LAME VIBRANTE (OU TREMBLEUR)

On emploie différents moyens pour établir ou rompre le circuit.

(1) Il en résulte que la durée du courant induit direct est prolongée, et par suite sa tension affaiblie. En outre, l'extra-courant se manifeste par une étincelle qui éclate entre les contacts de l'interrupteur, altère rapidement les surfaces de contact et souvent les fait adhérer l'une à l'autre. Avec le condensateur, l'étincelle diminue, puisque les deux électricités qui la produisent se répartissent sur un plus grand espace. Le condensateur, en se déchargeant ensuite, détruit brusquement l'aimantation du fer doux : le courant induit direct est donc moins prolongé et par suite plus intense. L'addition du condensateur est due à M. Fizeau. J. R.

La forme d'interrupteur qui est universellement employée pour les petites bobines est appelée la lame vibrante (*vibrator*, trembleur) (fig. 202). Cet interrupteur est formé d'une pièce de fer supportée en regard de l'une des extrémités du noyau de la bobine par un ressort de laiton ou d'acier, qui tend à l'écarter du noyau et à appliquer contre un arrêt à pointe de platine un morceau de platine soudé au dos du ressort. La position de cet arrêt

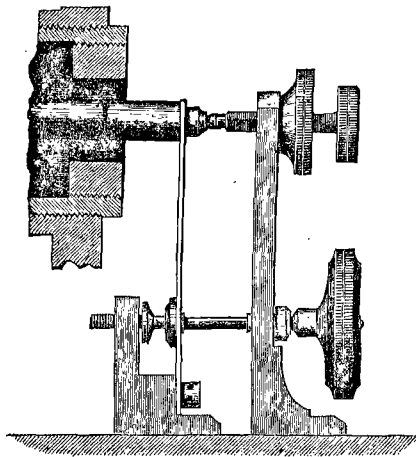


FIG. 202.

peut être réglée par une vis. Le courant primaire passe de l'arrêt au ressort.

Une deuxième vis règle la tension du ressort : elle tourne dans un collier d'ivoire qui l'isole, et a généralement une tête en ébonite.

Lorsque le courant passe, le noyau de fer s'aimante, attire en avant le ressort, sépare les contacts de platine et rompt le courant ; au même instant l'aimantation du noyau est détruite et le ressort, revenant en arrière, ferme le cir-

cuit : le courant passe de nouveau et cette série d'opérations entretient une vibration constante. Si le ressort est faible, le courant est rompu lorsque le noyau n'a encore qu'une force magnétique peu considérable, et le courant d'induction produit est faible. On peut, en serrant le ressort, régler l'appareil de façon que le courant ne soit rompu que quand le noyau a acquis à peu près son maximum d'aimantation : on produit ainsi un courant d'induction bien plus énergique.

La lame vibrante a cet avantage que, avec une pile énergétique, on peut à volonté avoir une étincelle très faible ou développer presque toute la puissance de la bobine; ces changements s'obtiennent en tournant simplement la vis de serrage. La lame vibrante ne convient pas pour les très grandes bobines, parce que l'échauffement dû à l'étincelle de l'extra-courant, au point où le contact est établi et rompu, est suffisant pour fondre le platine et endommager la bobine : cette étincelle enlève aussi à la rupture sa soudaineté, car la flamme conduit l'électricité.

Une bobine donnant une étincelle de 17 pouces (43 centimètres) constitue à peu près le plus grand modèle pour lequel on puisse employer la lame vibrante avec sécurité (1).

INTERRUPTEURS A MAIN ET A MOUVEMENT D'HORLOGERIE

Dans ces instruments, une lige de platine plonge dans un amalgame de mercure et de platine et en sort alternativement : cet amalgame est déposé au fond d'un vase de verre dont la partie supérieure est remplie d'alcool, pour arrêter l'étincelle de l'extra-courant. Dans l'interrupteur à

(1) M. Apps m'annonce qu'il vient de réussir à employer la lame vibrante dans des bobines donnant des étincelles de 26 pouces (66 centimètres). — Mars 1880.

main (fig. 203), le plongeur est abaissé avec la main, pour établir le contact, et il est relevé par un ressort. Dans l'in-

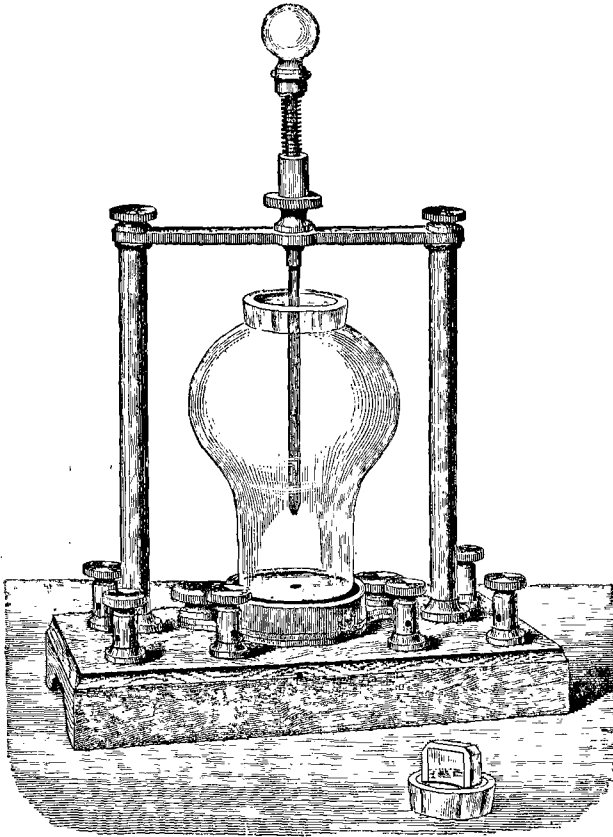


FIG. 203.

terrupteur à mouvement d'horlogerie (fig. 204), le plongeur est élevé ou abaissé par une manivelle mue par un mouvement. La vitesse de ce mouvement se règle au moyen d'ailettes que l'on peut tourner de façon à présenter à l'air plus ou moins de résistance.

INTERRUPTEUR A ROUE DE SPOTTISWOODE

Il est employé dans les expériences sur les tubes à vide, et il a pour objet d'établir le contact et de le rompre très

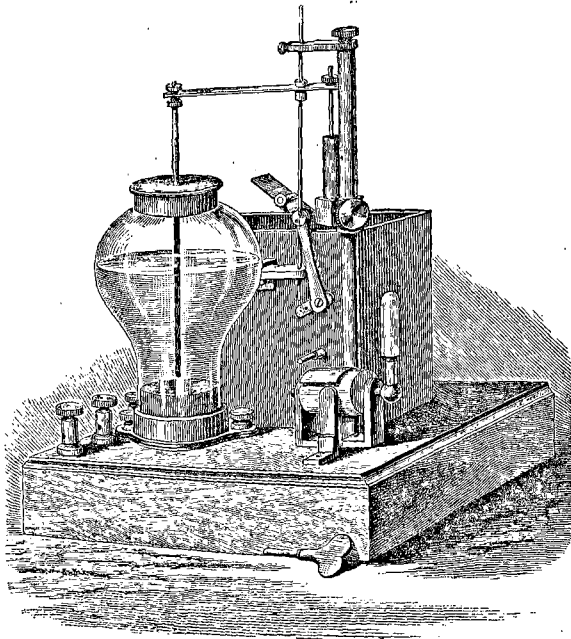


FIG. 204.

rapidement. Il consiste en une roue de laiton portant un certain nombre de fentes dirigées suivant les rayons et remplies d'ébonite. Un léger ressort de platine appuie sur la circonférence; il est tenu dans une mâchoire garnie de caoutchouc pour amortir les vibrations. Quand la roue tourne, le contact est rompu chaque fois qu'une des fentes passe sous le ressort. Sur l'axe de la roue est une petite poulie sur laquelle s'applique la courroie de transmission

reliée à un volant commandé par la main, ou, comme au laboratoire de M. Spottiswoode, par une petite machine à vapeur.

INTERRUPTEUR RAPIDE DE SPOTTISWOODE (1)

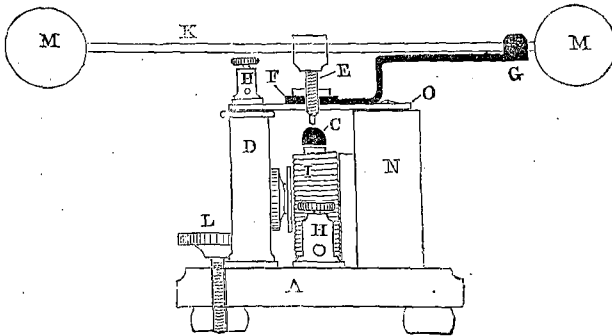


FIG. 205. — Élévation de bout de l'interrupteur de contact, demi-grandeur (linéaire).

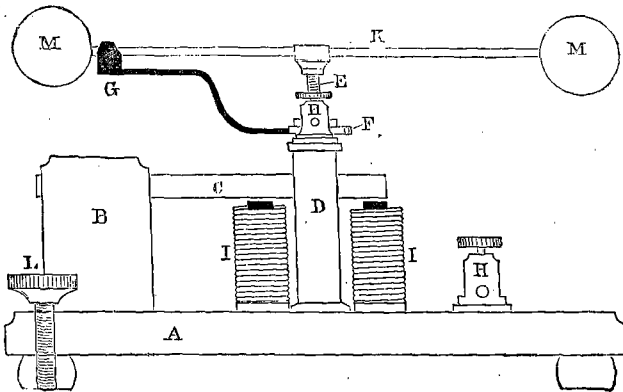
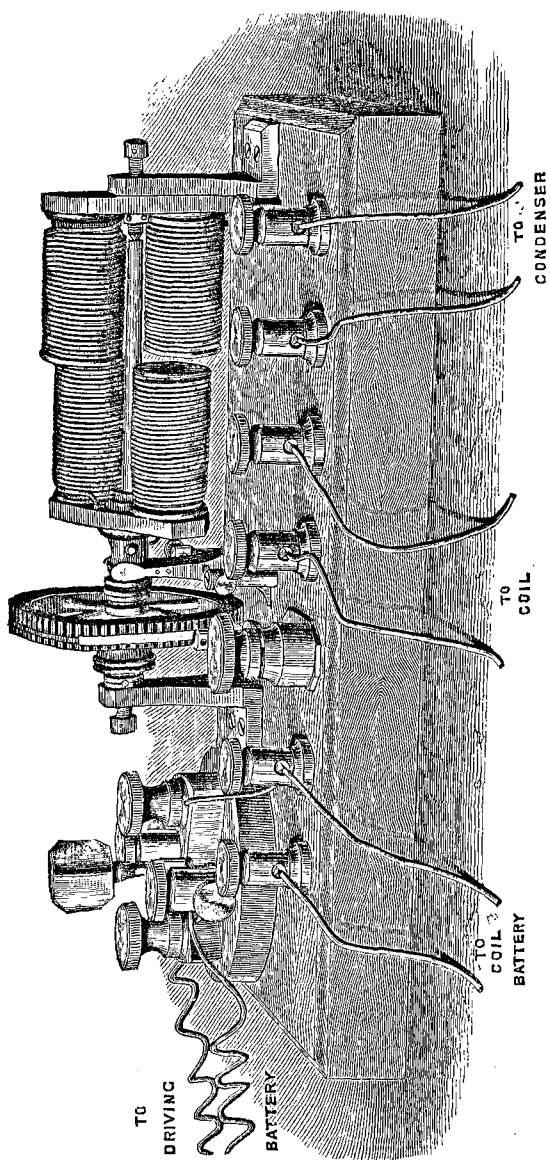


FIG. 206. — Élévation de côté de l'interrupteur de contact, demi-grandeur (linéaire).

A. Socle d'acajou. — B. Forte colonne en bronze portant le ressort vibrant. — C. Ressort vibrant. — D. Colonne en bronze portant le plateau horizontal O. — E. Vis à pointe de platine formant contact. — F. Collier à frottement pour teuir le bras d'arrêt. — G. Bras d'arrêt. — H, H. Électrodes. — I, I. Electro-aimant. — K. Levier pour le réglage de précision. — L. Vis calante. — M, M. Poids compensateurs. — N. Support en bois pour l'électro-aimant.

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. XXIII, p. 455.



Pl. XXXIII. Interrupteur à grande vitesse.

To driving battery = A la pile du moteur. *To coil battery* = A la pile de la bobine. *To coil* = A la bobine. *To condenser* = Au condensateur.

C'est une forme particulière d'interrupteur que M. Spottiswoode a employée pour ses expériences sur les tubes à vide. Les contacts sont établis et rompus par les vibrations d'une tige d'acier courte et épaisse, fixée solidement par un bout et dont le mouvement est entretenu par un petit électro-aimant indépendant. Le nombre des vibrations par seconde des différentes tiges essayées, sous l'influence de l'aimant, variait de 700 à 2500. L'amplitude de chaque vibration n'était pas supérieure à $1/4$ de millimètre (1).

INTERRUPTEUR A GRANDE VITESSE DE GORDON (pl. XXXIII)

L'auteur a disposé un interrupteur pour des expériences de capacité inductive spécifique qui exigeaient une vitesse énorme (voir vol. I, p. 178). Il consiste en une petite machine électro-magnétique (2) dont le volant a environ 5 centimètres de diamètre. Soixante fentes sont pratiquées sur ce volant et remplies d'ébonite : un ressort léger appuie dessus, et le courant primaire, pour aller de la pile à la bobine, doit passer du ressort au volant. Quand la roue tourne, il y a donc soixante fermetures et soixante ruptures du courant par tour.

(1) M. Ward, aide de M. Spottiswoode, et l'inventeur de l'interrupteur *rapide*, m'écrivit à ce sujet : « Un des caractères des interrupteurs à roue et rapide est l'extrême petitesse de la quantité d'électricité qu'ils donnent. Dans certaines petites bobines où la longueur de l'étincelle, avec la lame vibrante, ne dépasse pas $\frac{1}{10}$ de pouce ($2^{\text{mm}},5$), on ne peut pas supporter l'effet de la décharge à travers le corps, tant est grande la secousse. Avec mon interrupteur rapide et des bobines plus grandes, on peut recevoir sans crainte, en un point quelconque du corps, des étincelles de $\frac{1}{4}$ et de $\frac{3}{8}$ de pouce (de 6,3 à 9,5 millimètres). J'ai aussi constaté par un autre caractère la qualité statique relativement élevée de l'étincelle, soit par l'attraction que les électrodes de la bobine exercent sur des morceaux de papier, etc., soit par la façon dont les fils partant des électrodes s'attirent l'un l'autre à grande distance, s'ils sont libres de se mouvoir. »

(2) Voir chap. XL.

Quand la machine est actionnée par quatre grands éléments de Grove, le volant fait juste 100 tours par seconde, et le circuit primaire est établi 6000 fois et rompu 6000 fois par seconde.

BOBINE DE M. SPOTTISWOODE (pl. XXXIV)

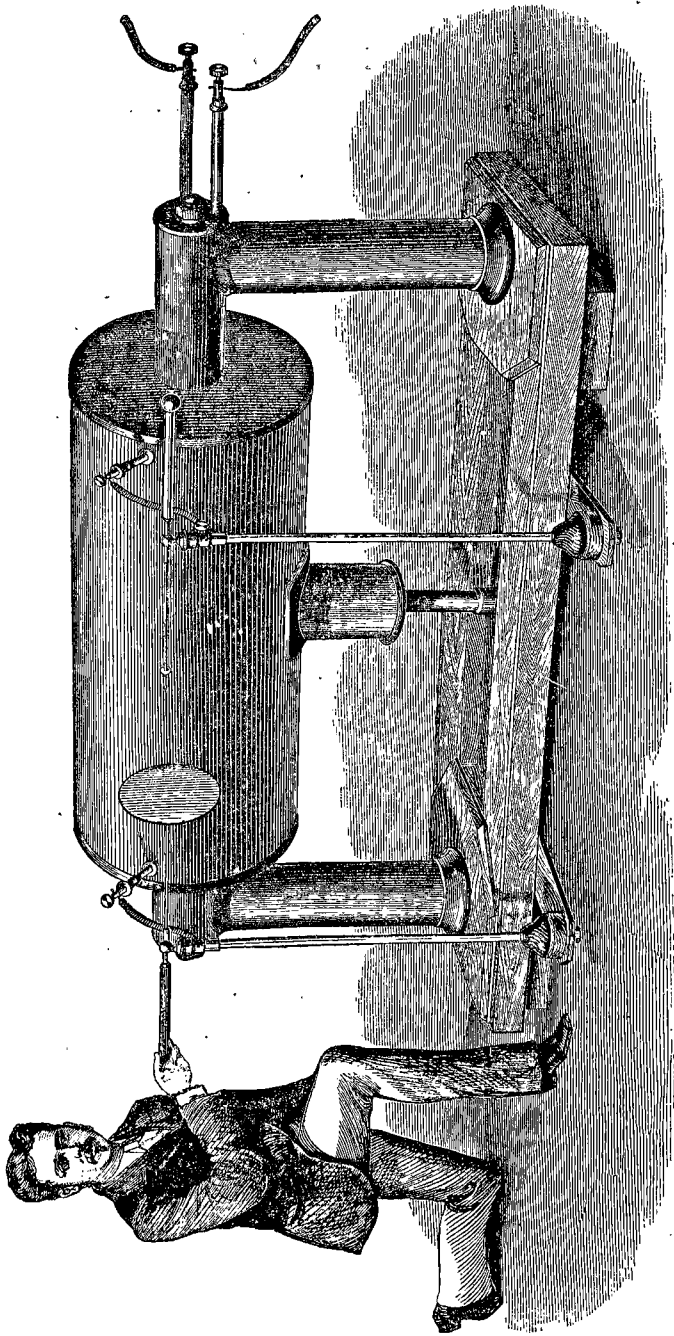
Cette bobine, la plus grande qui ait jamais été construite, est décrite dans le *Philosophical Magazine* de janvier 1877.

Elle a été construite par M. Apps. Le poids total de la bobine est de 762 kilogr. ; sa longueur est de 1^m,22 ; son diamètre extérieur, de 0^m,508. Elle est supportée aux extrémités par deux colonnes massives ; au milieu, un pilier, que l'on peut régler par une vis, empêche les flexions qui pourraient se produire.

Il y a deux circuits primaires, que deux hommes peuvent substituer l'un à l'autre dans l'espace de quelques minutes. Celui qui sert pour obtenir de longues étincelles et pour la plupart des expériences a un noyau consistant en un faisceau de fils de fer de 1^m,12 de long et de 0^m,09 de diamètre, pesant 30^{gr},5.

Le fil de cuivre de cette bobine primaire est long de 546 mètres ; il a un diamètre de 0,096 (presque 1/10) de pouce, soit de 2^{mm},5 et une résistance totale de 2,3 U.B.A, avec une conductibilité de 93 pour 100. La bobine contient 1344 tours formant 6 couches ; son poids est de 25 kilogr. ; sa longueur totale 1^m,07. L'autre circuit primaire, destiné à donner des étincelles courtes et nourries, a un noyau plus épais pesant 42 kilogr., et le fil est enroulé en double toron, ce qui lui donne bien moins de résistance.

La bobine secondaire ne comprend pas moins de 450,5 kilomètres de fil, formant un cylindre de 0^m,95 de



Pl. XXXIV. — Grande bobine de M. Spottiswoode.

long, de 0^m,508 de diamètre extérieur. Sa résistance totale est de 110 200 U.B.A. Elle est divisée en quatre sections. Le diamètre du fil employé pour les deux sections centrales est de 0,0095 (presque 1/100) de pouce, soit 1/4 de millimètre; celui des sections extérieures est un peu plus gros.

L'augmentation du diamètre du fil près des extrémités se fait en prévision de la charge accumulée qui doit traverser cette partie du fil. Le nombre total des tours dans le circuit secondaire est de 341 850. Dans cette bobine, et dans toutes les autres grandes bobines faites par M. Apps, le fil secondaire est enroulé sur un certain nombre de disques séparés par des plaques d'ébonite. La raison de cette disposition est que lorsque l'on enroule le fil en couches, des portions du fil qui sont à des potentiels très différents se trouvent être très voisines, et par suite la matière isolante subit une tension considérable. Quand le fil est enroulé en disques, les parties dont les potentiels diffèrent beaucoup sont séparées par des plaques d'ébonite (1).

On a reconnu que le condensateur le plus convenable était bien plus petit qu'on ne le supposait, et on a obtenu les meilleurs résultats avec un condensateur de mêmes dimensions que celui employé pour une bobine donnant une étincelle de 10 pouces, soit 25,4 centimètres. Il est formé de 126 feuilles d'étain de 45,6 centimètres sur 46,3, séparées par du papier verni.

(1) Le fractionnement de la bobine totale en bobines juxtaposées a été proposé par Poggendorff. Quand le fil secondaire est enroulé par couches superposées sous forme de spirales allant d'une extrémité à l'autre et revenant au point de départ, on voit qu'à l'extrémité d'où l'on est parti deux tours superposés sont séparés par la longueur de fil formant deux couches: il en résulte une différence de potentiel considérable, capable de briser l'enduit isolant qui sépare les couches. Un accident de ce genre mettrait hors d'usage la longueur de fil interposée entre les deux tours mis en communication. Le cloisonnement de la bobine prévient cet accident.

J. R.

En employant le plus petit des circuits primaires, cette bobine donne :

Avec 5 éléments Grove de la contenance de 1 ^{lit} ,136, une étincelle d'une longueur de 28 pouces, soit.	0 ^m ,71
Avec 10 éléments 35 —	0 ^m ,89
Avec 30 — 42 $\frac{1}{2}$ —	1 ^m ,08

Une étincelle de 42 pouces $1\frac{1}{2}$ (1^m,08) est de beaucoup la plus grande que l'on ait jamais obtenue avec un appareil électrique quelconque.

BOBINE DE RUIHKORFF

La figure 207 représente le grand modèle des bobines d'induction de Ruhmkorff. Dans ce modèle, l'interrupteur M est complètement distinct de l'appareil et actionné par une petite pile spéciale de 2 éléments, dont les pôles sont reliés aux fils C et D.

Cet interrupteur est dû à Foucault : une tige élastique verticale R, qu'on peut soulever ou abaisser par une crémaillère, décrit, quand elle est dérangée de son équilibre, des oscillations qu'on rend plus ou moins rapides à l'aide d'une boule mobile qu'une vis de pression permet de fixer sur la tige à une hauteur convenable. Cette tige entraîne dans son mouvement une sorte de fléau de balance IL, qui porte à une de ses extrémités I une armature de fer doux placée en regard des pôles d'un électro-aimant, et à l'autre extrémité L deux pointes de platine verticales plongeant chacune dans un godet en verre à fond métallique contenant du mercure (ou un amalgame de platine) et une couche d'alcool superposée : à l'état de repos, les pointes sont baignées par l'alcool et affleurent à la surface du mercure. L'un des godets sert aux interruptions du courant inducteur, l'autre aux interruptions du courant de l'électro-aimant qui entretient les oscillations de la tige. Ce courant local est amené par les fils C et D à un commutateur analogue à celui décrit vol. I, p. 472, fig. 95.

Le commutateur étant convenablement tourné, le courant local arrive au fond du godet le plus rapproché de la tige R, passe dans la pointe de platine, la tige R, traverse l'électro-aimant et retourne à la pile par le commutateur. L'armature étant attirée, la pointe est soulevée, sort du mercure et interrompt le courant; mais la tige R

ramène par son élasticité la pointe dans le mercure et ferme de nouveau le circuit : de là un mouvement continu d'oscillation.

Les fils E et F sont reliés à la pile du courant inducteur : ce courant arrive par un commutateur identique au précédent au fond du godet P, et, si la pointe qui plonge dans ce godet touche le mercure, il passe par cette pointe et la tige R dans le circuit inducteur et revient au commutateur. Si la pointe est relevée au-dessus du mercure, le courant inducteur est interrompu.

La couche d'alcool empêche l'oxydation du mercure qui résulterait

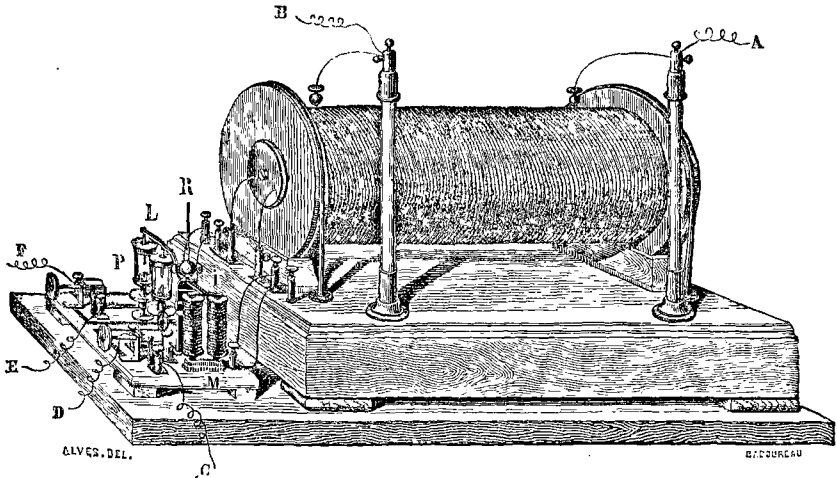


FIG. 207. — Bobine de Ruhmkorff.

de la chaleur produite par l'étincelle de l'extra-courant dans l'air ; l'alcool détermine, de plus, une rupture brusque du contact ; car ce liquide, mauvais conducteur, se glisse sous la pointe dès qu'elle se soulève ; tandis que, par les vapeurs métalliques que l'étincelle formerait dans l'air, le courant continuerait à passer en ne s'affaiblissant que peu à peu.

Les deux extrémités du fil induit sont reliées à deux vis d'attache portées par des pieds de verre et formant les deux pôles ou électrodes de la bobine.

Les grandes bobines construites dans les ateliers Ruhmkorff ont environ 0^m,60 de longueur et contiennent 120 kilomètres de fil induit : avec une dizaine de couples Bunsen, elles peuvent donner des étincelles de 0^m,45.

BOBINE DE SIEMENS

Le noyau est formé d'un faisceau de fils de fer de $1^{\text{mm}},3$ de diamètre et $0^{\text{m}},95$ de long, formant un cylindre de $0^{\text{mm}},06$ de diamètre. Sur ce cylindre sont enroulées deux couches de fil de cuivre de $2^{\text{mm}},5$ de diamètre formant le circuit primaire. Le noyau et la bobine primaire sont introduits dans un tube creux d'ébonite, cylindrique à l'intérieur, mais dont l'épaisseur augmente du milieu aux extrémités. Il présente, en effet, une épaisseur de 26 millimètres aux extrémités et de 12 seulement au milieu; le long de ce tube sont fixés, à intervalles égaux, 15 disques minces d'ébonite, et 2 disques épais de la même matière forment les extrémités. Chaque intervalle entre deux disques consécutifs est rempli de fil de cuivre de $0^{\text{mm}},14$ recouvert de soie et verni : ces bobines sont reliées en séries de telle sorte que le courant passe de l'extérieur à l'intérieur d'un compartiment, et de l'intérieur à l'extérieur du suivant. La longueur du fil secondaire est de 129 000 mètres. Le potentiel a évidemment sa plus grande valeur positive ou négative dans les compartiments extrêmes, et sa plus petite valeur dans celui du milieu; le danger de rupture du tube de séparation des deux circuits est donc plus grand aux extrémités qu'au milieu : de là la plus grande épaisseur donnée aux bouts du tube. Cette épaisseur diminue, en outre, l'action de condensation de la bobine primaire sur les compartiments extrêmes du fil secondaire.

Avec 1 élément Bunsen, la bobine de Siemens donne une étincelle de $0^{\text{m}},21$; avec 6 éléments, une étincelle de $0^{\text{m}},58$.

BOBINE DE L'INSTITUT POLYTECHNIQUE DE LONDRES

Cette bobine a 3 mètres de longueur; le noyau, en fil de fer, pèse 46 kilogrammes; il est entouré d'un fil inducteur de 3450 mètres qui pèse 54 kilogrammes. Le fil induit, d'un diamètre de $4/10$ de millimètre, a 241 kilomètres de longueur. Excitée par 40 éléments Bunsen, elle donne des étincelles de $0^{\text{m}},74$, qui paraissent avoir près de $0^{\text{m}},02$ de diamètre et percent $0^{\text{m}},127$ de verre.

CHAPITRE XXXIV

DE LA DÉCHARGE DE LA BOBINE D'INDUCTION ET DE LA DÉCHARGE EN GÉNÉRAL

La décharge de la bobine d'induction présente de nombreuses analogies avec celle des machines électriques et en particulier avec celle de la machine de Holtz ; et l'exposé des faits observés dans le premier genre de décharge sera souvent, quoique pas toujours, applicable au second.

Les phénomènes que nous allons décrire ont été observés tous, à moins de mention contraire, avec la bobine de 17 pouces soit 0^m43 (pl. xxxii), actionnée par dix éléments de Grove, de la contenance de 1,136 litres, accouplés en série. Lorsqu'on produit la décharge entre une pointe et un disque séparés par la plus grande épaisseur d'air que puisse traverser l'étincelle, la pointe étant positive, la décharge consiste en une ligne en zigzags de lumière blanc-bleuâtre, accompagnée de deux sons bien distincts : l'un est un craquement qui, lorsque l'on emploie un interrupteur lent, se décompose lui-même au moment de chaque décharge en sons détachés et secs, analogues à la détonation d'une petite capsule ; l'autre est un sifflement résultant du temps appréciable nécessité par la décharge des 35 kil. de fil secondaire.

Ce dernier effet est particulièrement sensible quand les pointes sont rapprochées. Dans la grande bobine de M. Spottiswoode, lorsque les pointes sont écartées de quatre ou cinq pouces, soit de 10 à 13 centimètres, la décharge

sifflante dure deux secondes et plus. Quand la pointe est positive, la décharge se produit toujours vers le centre du disque, mais rarement deux fois exactement au même endroit. Si on renverse le courant, de façon que le disque soit positif, on n'obtient plus, avec une pile de même puissance, qu'une étincelle beaucoup plus courte, qui se produit entre la pointe et le bord du disque. Je ne sais pas que l'on connaisse la raison de cette différence.

Lorsqu'on diminue la force de la pile ou qu'on desserre le ressort vibrant de façon que la bobine ne donne plus sa plus grande étincelle, et qu'on écarte ensuite les tiges de décharge à une distance un peu plus grande que celle à laquelle peuvent passer les étincelles, on observe, en mettant la salle dans l'obscurité, que l'espace entre les pointes est éclairé d'une faible lueur bleue s'étendant à deux ou trois pouces (5 ou 7,6 centimètres) dans tous les sens autour de la ligne des pôles. C'est ce que l'on appelle la décharge « en aigrette ».

Si les pointes sont amenées aux environs du maximum de la distance à laquelle l'étincelle peut passer, on observe souvent à la fois l'étincelle et l'aigrette.

Si les pointes sont rapprochées à deux ou trois pouces (5 ou 7,6 centimètres), la décharge est plus nourrie et presque silencieuse; elle est entourée d'une masse de flammes jaunes d'une épaisseur de $1/2$ à $3/4$ de pouce, soit de 1,27 à 1,9 centim., due surtout à la combustion du sodium dans l'air. On peut éteindre ces flammes par un courant d'air, sans que l'étincelle en soit affectée; on peut allumer une bougie ou un morceau de papier.

La décharge à travers le corps, même celle d'une très-petite bobine d'induction, cause une vive douleur et une contraction musculaire; généralement, le patient ne peut

plus lâcher les électrodes. La décharge d'une bobine comme celle de 17 pouces ($0^m,43$) serait sans doute fatale, car la décharge d'une bobine donnant une étincelle de $1/4$ de pouce ($6^m/m$) est le maximum de ce que l'on peut supporter sans danger (1).

Si on dispose un miroir ordinaire, de $0^m,38$ sur $0^m,25$, le dos contre le disque d'une bobine de 17 pouces ($0^m,43$), et si on amène la pointe près du milieu de la face du miroir, on observe un très-bel effet. La décharge semble frapper le verre; puis se résoudre en une sorte de pluie de feu, s'étendant dans tous les sens vers les bords, d'où elle est conduite au disque par le mercure et le dos en bois du miroir.

On peut percer des épaisseurs considérables de verre en appliquant sur les faces opposées d'une plaque de verre les pointes qui terminent le circuit secondaire, et entourant les électrodes d'un mastic. Avec la grande bobine polytechnique, la plus grande après celle de M. Spottiswoode, on a percé 5 pouces ($0^m,127$) de verre. Jusqu'à présent M. Spottiswoode n'a pas essayé de percer plus de 3 pouces ($0^m,076$); mais il a trouvé qu'il suffit, pour cette épaisseur, de l'étincelle de 28 pouces ($0^m,71$) donnée par cinq éléments de 1,136 litre, et il a calculé que l'étincelle de 42 pouces ($1^m,07$) percerait six pouces ($0^m,15$) de verre.

DÉCHARGE AVEC L'INTERRUPTEUR RAPIDE

On peut, en employant un des interrupteurs rapides, obtenir alternativement des électrisations *égales* et oppo-

(1) Avec la grande bobine construite par M. Apps pour la Royal Institution et qui donne une étincelle de 29 pouces ($0^m,735$), on a administré une décharge à un lapin sans causer la mort. Mais il est probable que, le lapin ayant bien moins de 29 pouces de long, la plus grande partie de la décharge passait par l'air, autour et non au travers de son corps.

sées. Il faut employer une grande bobine et une petite pile.

Avec la bobine de 17 pouces ($0^m,43$), actionnée par 10 petits éléments Leclanché assemblés en série, et l'interrompteur à grande vitesse (Pl. xxxiii), l'électrisation des pôles secondaires peut être inversée environ 1200 fois par seconde, et on trouve que les courants de fermeture et de rupture sont à peu près exactement de même force. On obtient une étincelle de $1/25$ de pouce ($1^m/m$), correspondant à une force électro-motrice d'environ 2050 éléments au chlorure d'argent (1).

CONDENSATEUR SECONDAIRE

Si on relie par des fils conducteurs les vis d'attaches du circuit secondaire aux armatures opposées d'une bouteille de Leyde ou d'un autre condensateur, le caractère de la décharge change. Les décharges ne sont plus aussi fréquentes, puisque la bouteille doit se charger dans l'intervalle de deux étincelles, mais l'étincelle est d'un blanc éblouissant et, au lieu du petit craquement qui est produit d'habitude quand l'étincelle éclate, on entend une série de détonations assourdissantes. Si on emploie un interrompteur lent, de façon à avoir un intervalle entre deux décharges, on entend le disque métallique résonner après chaque étincelle, comme si on l'avait frappé avec un marteau.

On emploie toujours dans les expériences de spectroscopie un condensateur secondaire qui donne à l'étincelle une grande puissance de combustion. Lorsqu'on fait éclater l'étincelle entre une pointe et un disque de plaqué poli,

(1) Voir *Phil. Trans.*, 1879, p. 419 et 423.

chaque décharge produit sur la surface brillante une petite tache qu'on ne peut plus effacer. Elle est due à la volatilisation et à la combustion d'un peu d'argent. Au lieu d'une seule bouteille de Leyde, on peut en employer plusieurs réunies « en quantité » ou « en cascade » : cette dernière disposition donne les meilleurs résultats (1).

Le bruit produit par une bouteille de 2,27 litres, avec une bobine de 17 pouces (0^m,43), est tel qu'il devient nécessaire d'élever la voix pour se faire entendre.

En même temps que la force de l'étincelle augmente, sa longueur diminue. Avec une grande jarre que je possède, d'une contenance de 50 litres et dont la surface revêtue mesure 70 décimètres carrés, la plus grande étincelle que donne la bobine de 17 pouces (0^m,43) est d'un peu moins d'un pouce (2^{cm},54). Avec de petites bouteilles, la longueur de l'étincelle est limitée par les dimensions des parties non revêtues, parce que si l'écartement des pointes dépasse une certaine distance, l'étincelle éclate le long du verre. Avec une bouteille de 2,27 litres, du type habituel, on peut obtenir une étincelle de cinq pouces (0^m,127).

La décharge de la bouteille perce le papier, mais ne l'enflamme pas.

(1) On dit que des bouteilles de Leyde sont réunies en *quantité* quand toutes les armatures intérieures sont reliées à un même pôle, et les armatures extérieures à l'autre. Quand elles sont mises en *cascade*, l'armature intérieure de la première est reliée à un pôle, et son armature extérieure à l'armature intérieure de la deuxième ; l'armature extérieure de la seconde à l'armature intérieure de la troisième, etc. ; l'armature extérieure de la dernière est reliée à l'autre pôle. De *quelque manière* que les bouteilles soient reliées à une grande bobine, elles doivent être placées sur des supports isolants et *ne pas* communiquer avec la terre.

LA BOBINE D'INDUCTION ET LES MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES OU MACHINES « DYNAMO »

En novembre 1879, M. Spottiswoode (1) a publié les résultats de quelques expériences, où une bobine de 20 pouces (0^m,508) recevait le courant d'une machine dynamo de Méritens (2) actionnée par une machine à gaz de 3 1/2 chevaux. Cette machine donne des courants *alternatifs* dont le sens change environ $16 \times 1500 = 20\,800$ fois par minute; on n'avait donc pas besoin d'interrupteur ni de condensateur primaire.

Cette manière de procéder donne des courants secondaires de « quantité » considérable.

Avec une bobine de 20 pouces (0^m,508), l'étincelle a environ 7 pouces de longueur (0^m,18) et la « grosseur d'un crayon ordinaire ». La décharge est très-régulière et peut être employée sans condensateur secondaire pour la spectroscopie.

DÉCHARGE DANS L'AIR RARÉFIÉ

Si la décharge d'une bobine ou d'une machine électrique est envoyée à travers un tube ou un autre récipient relié à une pompe à air (machine pneumatique), on observe que, à mesure que la pression diminue, la longueur de l'étincelle que l'on peut obtenir augmente. De nombreuses expériences ont été faites pour déterminer la loi exacte suivant laquelle la longueur de l'étincelle augmente quand la pression diminue.

En 1834, Sir Snow Harris constata (3) que, toutes

(1) *Phil. Mag.*, 1879, p. 390.

(2) Voir chap. XI.

(3) *Phil. Trans.*, 1834.

choses égales d'ailleurs, la longueur de l'étincelle, que donne dans l'air une machine électrique ou une bouteille de Leyde, varié en raison inverse de la pression. Mais il ne donna ni nombres ni tables à l'appui de cette loi.

Dans les expériences faites par M. Masson (1), l'étincelle passait entre deux boules dans l'air, ou entre deux boules semblables enfermées dans un globe où l'on pouvait faire un vide plus ou moins parfait. On pouvait faire varier l'écartement des boules aussi bien que la pression. Dans les limites de ses expériences, M. Masson a trouvé que la longueur de l'étincelle était inversement proportionnelle à la pression. L'étincelle la plus longue qu'il ait employée avait 11, 1 millimètres.

En 1843, M. Knochenhauer (2) opéra avec une étincelle de longueur constante, de $\frac{3}{4}$ de pouce (0^m,019) environ (3), et mesura la densité électrique nécessaire pour produire cette étincelle dans l'air à différentes pressions. Dans les limites de ses expériences, il trouva que le rapport de la densité électrique, nécessaire pour la production de l'étincelle, à la pression de l'air croît sensiblement à mesure que la pression diminue. Or la longueur d'étincelle est proportionnelle à la densité électrique, et par suite les résultats de Knochenhauer montrent que la loi énoncée par Harris et Masson ne s'applique pas à toute distance et à toute pression.

Wiedemann et Rühlmann (4) ont trouvé une formule

(1) *Ann. de Chimie*, 3^e série, t. xxx, ou *Mascart, Électricité statique*, t. II, p. 94.

(2) *Pogg. Ann.*, LVIII, p. 219; ou *Mascart*, t. II, p. 95.

(3) Il n'indique pas la longueur de l'étincelle qu'il employait, mais donne la hauteur de tout son appareil, et un dessin qui, s'il est à l'échelle, montre que les boules de décharge étaient écartées de $\frac{3}{4}$ de pouce environ.

(4) *Mascart*, vol. II, p. 97.

purement empirique pour les variations de longueur de l'étincelle, la plus grande étincelle étant de 9,95 millim.

EXPÉRIENCES DE GORDON

A la réunion de Dublin de l'Association Britannique, l'auteur a rendu compte (1) de quelques expériences récentes qu'il avait faites sur ce sujet. Il avait essayé de déterminer le rapport de la longueur d'étincelle à la pression pour des distances variant de 6 à 30 pouces ($0^m,15$ à $0^m,76$) en se servant toujours du même appareil. Ces expériences diffèrent de toutes les expériences antérieures, dont l'auteur a connaissance, en ce qu'il emploie la bobine d'induction, au lieu de la machine électrique, comme source d'électricité.

APPAREIL EMPLOYÉ

La bobine était celle de 17 pouces ($0^m,43$) dont on a déjà parlé (pl. XXXII). Elle était actionnée par 10 éléments de Grove, d'une contenance de 1,136 litre, réunis en série. Elle était munie d'une lame vibrante et d'un interrupteur à mouvement d'horlogerie, que l'on pouvait employer à volonté.

La pompe à air était du type ordinaire de Tait.

Les *tubes de décharge* étaient des tubes cylindriques de verre, de 4 pieds (1,20 mètre) de long, et de près de 3 pouces ($0^m,076$) de diamètre. A l'un des bouts de chaque tube était un robinet, dont le tuyau de bronze se terminait par une boule formant l'une des électrodes de décharge. Des trous percés sur le côté du tuyau de bronze laissaient arriver l'air du robinet au tube de verre. A l'autre bout de chaque tube était un presse-étoupes, où glissait

(1) *Phil. Mag.*, sept. 1878, p. 185. *Abstract in B. A. Report 1878*, p. 433.

une tige de laiton terminée par une pointe que l'on pouvait mettre en contact avec la boule, ou écarter de celle-ci d'environ 3 pieds (0^m,91). La pointe de la tige était toujours maintenue dans l'axe du tube par trois petits guides de verre fixés dans une bague d'ébonite attachée elle-même à la tige un peu en arrière de la pointe. Les deux tubes étaient placés horizontalement, parallèles l'un à l'autre et

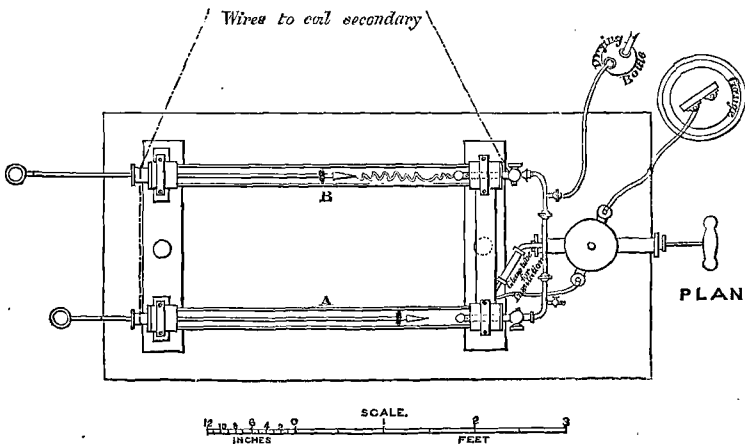


FIG. 208.

Wires to coil secondary = Fils reliant à la bobine secondaire. *Drying bottle* = Flacon dessiccateur. *Gauge* = Manomètre. *Glass tube for insulation* = Tube de verre pour isoler. — Échelle en pieds et pouces.

écartés d'environ 18 pouces, sur 3 pieds d'ébonite de 18 pouces (0^m,46) environ de haut. Les tubes étaient reliés entre eux et à la pompe à air par des tuyaux et des robinets que l'on voit sur la fig. 208 et qui sont disposés de façon que l'on puisse relier rapidement les tubes entre eux, à l'air extérieur, à un gazomètre ou à la pompe. Entre les tubes et la pompe, le tuyau de métal était coupé, et un bout de tube de verre, de 18 pouces (0^m,46) environ, bien verni

à la gomme laque, était introduit de façon que l'électricité ne pût passer à la terre à travers la pompe (1).

LES EXPÉRIENCES

Quand la communication était interceptée entre les tubes et la pompe, on pouvait toujours laisser de l'air dans le bout de tube de verre, pour empêcher la décharge de se faire à la terre par l'intérieur de ce tube, ce qui arriverait aux basses pressions. La distance de la pointe à la boule se mesurait comme il suit : on les mettait en contact et on faisait une marque à l'encre sur la tige de décharge, juste en dehors de la monture du presse-étoupes. Quand on faisait glisser la tige, la distance de la boule à la pointe était égale à la distance de cette marque à la monture. Sa pression était donnée par un manomètre en U, de 4 pieds (1^m,20) de haut, dont un des bouts communiquait à la pompe à air et l'autre à l'air libre. La pression P était donnée par la formule :

$$P = (\text{hauteur du baromètre}) - (\text{différence de niveau du mercure dans les deux branches du manomètre}).$$

Avant d'entrer dans les tubes, l'air se desséchait en barbotant dans l'acide sulfurique. Si on voulait que la pression de l'air dans les tubes fût égale à celle de l'air extérieur, on laissait l'air passer bulle à bulle à travers l'acide, tant que la différence des pressions entre l'extérieur et l'intérieur du tube dépassait la pression d'un pouce (2,54 c.) de l'acide à déplacer. Alors on ouvrait directement les robinets à l'air extérieur. Les diamètres extérieurs des tubes étaient de 2,94 et 2,76 pouces (7,46 et 7 centimètres), et

(1) M. Apps m'informe qu'on détériore les bobines en mettant à la terre une des extrémités du circuit secondaire quand on emploie de longues étincelles.

celui des boules 0,91 et 0,92 pouces (2,31 et 2,34 cent.).

Dans les expériences, un des tubes (A) était laissé ouvert à l'air extérieur, et la pointe de décharge était fixée à une distance étalon de 6,8 ou 10 pouces (15,2; 20,3; 25,4 cent.) de la boule ; le vide étant presque parfait dans l'autre tube (B), on commençait les opérations à basse pression en laissant entrer un peu d'air entre chaque observation. Les tubes étaient reliés à la bobine de façon que la décharge passât dans celui des deux tubes qui présentait le moins de résistance. On faisait alors varier la distance de décharge dans B, et on la réglait au *minimum* de la distance pour laquelle toute la décharge passait par A. Cette distance notée, on rapprochait les pointes dans B, jusqu'à ce qu'on eût atteint le *maximum* de la distance pour laquelle toute la décharge passait par B (1). On prenait la moyenne de ces deux distances pour représenter la distance qui, à la pression où l'on opérait, introduisait dans B une « résistance » égale à la résistance de la longueur étalon d'air à la pression atmosphérique dans le tube A.

Appelons cette moyenne « étincelle moyenne en B ». Si la loi du rapport inverse de la longueur d'étincelle à la pression est vraie, nous aurons pour une même série d'expériences :

$$(\text{étincelle moyenne B}) (\text{pression en B}) = \text{const.}$$

et, pour comparer différentes séries faites avec des distances en A et des hauteurs barométriques différentes, nous aurons :

$$\frac{(\text{étincelle moyenne B}) (\text{pression en B})}{(\text{distance en A}) (\text{hauteur barométrique})} = \text{const.}$$

(1) Le fait que la décharge ne se partage entre les deux tubes que lorsque les résistances sont presque égales confirme la découverte de M. de la Rue (vol. II, ch. xxxv) que la décharge disruptive ne suit pas la loi de Ohm.

Si les deux tubes et les pointes de décharge étaient exactement pareils, cette constante serait l'unité. La plus légère différence dans la forme des pointes et des boules la fera différer de l'unité, mais sans affecter sa constance.

RÉSULTATS

Le tableau (pp. 126, 127), qui s'explique de lui-même, donne les résultats de différentes séries d'expériences disposés dans l'ordre des pressions croissantes.

Les conclusions que j'en tire sont :

1° Depuis une pression d'environ 11 pouces (28 centimètres) jusqu'à 1 atmosphère, la loi de Harris se vérifie approximativement. On ne voit pas d'écarts indiquant que le phénomène suive une autre loi ;

2° Toute loi obtenue ne peut être qu'approximativement vraie : car, lorsque la densité électrique est voisine de la limite où se produit la décharge, la moindre cause accidentelle, la présence d'un grain de poussière, une légère brûlure de la pointe par la précédente décharge, etc., déterminent la décharge. Le professeur Maxwell compare cette expérience à ce qui arrive quand on fait éclater un morceau de bois avec un coin. On peut déterminer la pression moyenne à exercer sur le coin pour fendre le bois, mais on ne peut pas dire que le bois se fendra exactement à cette pression ;

3° Lorsque la pression diminue au-dessous de 11 pouces (28 centimètres), le produit de la colonne VII diminue rapidement. Cela veut dire qu'à basse pression, l'étincelle produite par une force électro-motrice donnée est beaucoup plus petite que ne l'indique la loi de Harris, ou que la force électro-motrice nécessaire pour produire à basse pression une étincelle de longueur donnée est plus grande

EFFET DE LA PRESSION SUR LA LONGUEUR D'ÉTINCELLE. — EXPÉRIENCES DE GORDON

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.
Pression en B = hauteur barométrique moins la différence de niveau du mercure dans les branches du manomètre en U.	Écartement des pointes en B, pour lequel la décharge a lieu totalement en A.	Écartement des pointes en B.	Moyenne des colonnes II et III: c'est la longueur de l'étincelle qui, sous la pression portée à la colonne I, est produite par la même force électromotrice que celle qui donne dans l'air une étincelle de la longueur portée à la colonne V, le baromètre étant à la hauteur portée à la colonne VI.	Ecartement des pointes en A.	Baromètre = pression en A.	longueur d'étincelle en B × pression en B longueur d'étincelle en A × pression en A = (colonne IV.) × (colonne I.) = (colonne V.) × (colonne VI.)
pouces. 2,42 3,2 4,59 7,8 7,82 9,34 9,49 11,68 11,74 11,9 11,9 13,5 14,24 14,29 14,4 15,1 15,1 16,05 16,24 16,3 16,7	pouces. 30,6 36,1 29,7 26,8 22,0 21,4 17,7 19,0 17,2 13,7 23,8 45,2 44,2 18,8 23,2 15,2 12,4 12,6 19,0 14,9 15,2	pouces. 29,9 25,5 18,6 21,4 16,6 19,45 16,2 16,8 16,0 14,8 19,4 13,9 15,8 18,8 13,9 14,2 13,9 14,2 14,0 12,3 14,0 13,3	pouces. 26,75 30,8 20,65 23,9 19,3 20,62 16,95 17,9 16,6 12,75 21,6 14,55 13,75 16,3 21,0 14,55 12,45 14,45 17,5 11,3	pouces. 6 10 6 10 8 6 8 6 6 10 8 6 8 10 8 8 6 6 8 10 8 8	pouces. 29,64 29,70 29,64 29,70 29,65 29,65 59,64 29,65 29,64 29,60 29,70 29,50 29,64 29,65 29,70 29,50 29,60 29,64 29,65 29,70 29,50 29,64 29,65 29,70 29,50	0,364 0,332 0,533 0,627 0,636 0,812 0,904 0,881 1,095 0,854 0,821 0,928 1,101 0,982 1,020 0,931 1,003 1,065 0,989 0,960 0,799

17,6	19,1	17,2	18,1	10	29,70	1,072
17,64	14,7	41,1	11,4	6	29,64	1,131
18,2	12,1	10,7	11,4	6	29,60	1,168
18,4	14,8	12,7	13,75	8	29,50	1,072
18,75	13,0	11,6	12,3	8	29,65	0,972
19,49	11,3	9,2	10,25	6	29,64	1,123
19,6	16,7	15,3	16,0	10	29,70	1,055
19,8	13,6	11,6	12,6	8	29,50	1,057
20,7	10,6	9,4	10,0	6	29,60	1,165
21,3	13,3	11,2	12,25	8	29,50	1,105
21,54	9,2	8,2	8,7	6	29,64	1,053
21,9	16,8	14,7	15,7	10	29,70	1,157
22,2	15,8	14,1	14,9	10	29,70	1,114
22,54	8,2	7,7	7,95	6	29,64	1,008
22,6	13,0	10,6	11,8	8	29,50	1,130
23,6	15,8	13,7	14,7	10	29,70	1,168
23,7	9,6	8,2	8,9	6	29,60	1,187
24,1	13,1	11,1	12,8	8	29,50	1,307
24,14	7,8	6,9	7,35	6	29,64	0,997
24,6	15,2	13,9	14,5	10	29,70	1,201
24,8	8,4	7,0	7,7	6	29,60	1,075
25,1	13,1	10,0	11,55	8	29,50	1,228
25,4	14,8	13,5	14,1	10	29,70	1,205
25,49	7,5	6,7	7,1	6	29,64	1,018
26,2	11,6	9,0	10,3	8	29,50	1,143
26,4	14,3	13,2	13,7	10	29,70	1,218
26,99	6,6	6,2	6,4	6	29,64	0,971
27,4	7,3	6,6	6,95	6	29,60	1,072
27,7	10,7	8,6	9,65	8	29,50	1,133
27,7	14,6	12,1	13,3	10	29,70	1,240
28,54	6,3	5,9	6,1	6	29,64	0,978
28,6	13,6	12,3	12,9	10	29,70	1,242
29,64	5,6	5,2	5,4	6	29,64	0,900
29,7	12,9	11,4	12,1	10	29,70	1,210

que ne l'indique la loi de Harris. Ce résultat est d'accord avec le fait établi par M. de la Rue (vol. II, ch. xxxv), qu'à toutes les pressions, même les plus basses, la décharge est disruptive, et rien ne passe par conduction. Car, si, aux basses pressions, une partie de la décharge passait par conduction, on devrait s'attendre à ce que la force électro-motrice nécessaire fût plus petite, et non plus grande, que la force électro-motrice calculée d'après les expériences de Harris à hautes pressions.

EXPÉRIENCES DE SIR W. THOMSON

Il est intéressant de comparer ces résultats avec ceux des expériences historiques de Sir W. Thomson « sur la force électro-motrice nécessaire pour produire une étincelle » (1). Dans ces expériences, le potentiel ou la force électro-motrice nécessaire pour produire l'étincelle était mesuré avec un électromètre absolu (2).

La première colonne du tableau donne la longueur d'étincelle en pouces, la seconde donne la force électro-motrice correspondante ; la troisième est le rapport de la deuxième à la première et donne la force électro-motrice par pouce d'air aux différentes distances. Si la force électro-motrice nécessaire avait varié proportionnellement à la distance dans l'air, la troisième colonne serait constante.

Or, on voit que cette colonne n'est pas du tout constante, mais les nombres de cette colonne donnent un résultat bien curieux et inattendu, à savoir qu'il faut, pour produire l'étincelle à courte distance, une force électro-motrice plus grande par unité de longueur, que pour produire une étin-

(1) *Papers on Electrostatics and Magnetism*, p. 247; *Proc. Roy. Soc.*, 1860, vol. X, p. 326; *Phil. Mag.*, 1860, 2^e semestre.

(2) Vol. I, p. 187.

Longueur des étincelles en pouces. S.	Force électro-motrice (en unités arbitraires). F. E. M.	Force électro-motrice par pouce d'air (en unités arbitraires) F. E. M. S.
Pouces.		
0,007	2,4495	349,9
0,0105	3,0000	285,7
0,0115	3,1622	275,0
0,014	3,6055	257,5
0,017	4,0000	235,3
0,018	4,3589	242,2
0,024	5,4772	228,2
0,0295	6,3245	214,4
0,034	7,0710	208,0
0,0385	7,7459	201,2
0,041	8,3666	204,1
0,0445	8,9442	201,0
0,048	9,4868	197,6
0,052	10,0000	192,3
0,055	10,4880	190,7
0,058	10,9544	188,9
0,060	11,4017	190,0

celle à des distances plus longues; ou bien, si nous adoptons l'idée de Faraday que la tension existe en chaque point de l'air, les nombres montrent que l'air en couche mince a une résistance plus grande qu'en couche épaisse.

Nos résultats (pp. 126 et 127) concordent très bien avec ceux de Sir W. Thomson, lequel s'exprime ainsi : « Pour produire l'étincelle, il faut une force électro-motrice rapportée à l'unité de longueur plus grande *pour les courtes distances que pour les grandes.* » Aux mots en italiques, je substitue « *pour les faibles pressions que pour les hautes* ». Nous exprimons les deux idées à la fois en disant : « *Pour une résistance d'air faible que pour une plus forte* », ou bien : « *Pour des molécules d'air en petit nombre entre les pointes que pour des molécules plus nombreuses* ». Sir W. Thomson dit de ce résultat : « Il est dif-

ficile de l'expliquer même par des conjectures. » Je ne puis qu'en dire autant de mon côté.

EXPÉRIENCES DE DE LA RUE ET MÜLLER

Le 23 août 1877, MM. de la Rue et Müller communiquaient à la Société Royale un mémoire (1) dans la première partie duquel ils décrivent une série d'expériences « sur la distance explosive », c'est-à-dire sur la longueur de l'étincelle que l'on peut obtenir avec des piles variant de 1080 à 8040 éléments au chlorure d'argent, dans différents gaz, et avec des électrodes de formes et de substances différentes.

Les longueurs d'étincelles étaient mesurées au moyen du micromètre à décharges AB (fig. 209), qui pouvait être mis sous le récipient GG' d'une pompe à air, quand on voulait l'entourer d'une atmosphère d'un gaz quelconque.

La décharge avait lieu entre la pointe P et le disque D. On pouvait remplacer ces électrodes par d'autres de formes différentes.

Pour mesurer la distance comprise entre P et D, on notait la lecture du bouton d'ébonite de la vis micrométrique A au moment précis où l'étincelle pouvait passer, puis on tournait la vis jusqu'à ce que P et D fussent en contact (2). Une deuxième lecture du micromètre donnait par différence la « distance explosive ». La position de contact entre P et D était déterminée en disposant deux éléments de pile de façon que leur courant fût fermé à travers un

(1) *Proc. Roy. Soc.*, XXVI, 1877, p. 519; *Phil. Trans.*, 1879, vol. CLXIX, p. 155.

(2) Le pas de la vis était de $\frac{1}{50}$ de pouce, et le bouton d'ébonite A était divisé de façon à permettre d'évaluer des millièmes de pouces. L'échelle verticale le long de laquelle se meut le bouton divisé est graduée en centièmes de pouce.

galvanomètre indicateur quand le contact était établi. La tige R, qui joue dans un presse-étoupes, permettait de faire tourner la tête de la vis A sans ouvrir le récipient.

Le tableau suivant donne le résumé des résultats obtenus

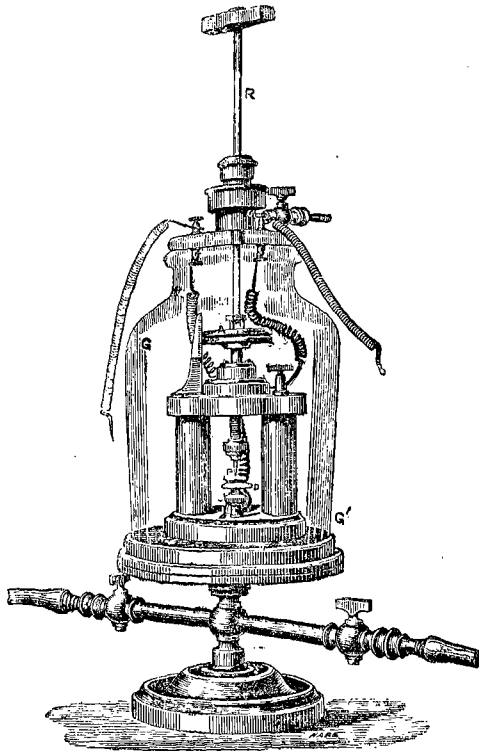


FIG. 209.

pour des décharges produites entre des *surfaces sphériques*. Pour que l'on puisse faire la comparaison, les nombres donnés dans le mémoire de Sir W. Thomson (dans un autre tableau que celui de la page 129) ont été réduits en volts, et sont figurés en caractères gras. On verra que

les nombres de M. de la Rue s'accordent en général avec ceux de Sir W. Thomson, mais que la diminution est moins rapide.

*Nombres en caractères gras, Résultats de Sir W. Thomson.
Nombres en caractères ordinaires, Pile au chlorure d'argent.*

Longueur d'étincelle en centimètres.		F. E. M. en éléments au chlorure d'argent (1).	Différence de potentiel en volts par centimètre.	
	0,0086			80230
0,01263	0,0127	1080	88060	77000
0,01461	0,0152	1200	84590	78660
0,03642	0,0190	2160	61090	67260
0,04414	0,0281	2400	60900	60220
0,06440	0,0408	2400	56010	45450
0,06440	0,0563	3240	52050	43210
0,07649	0,0584	3600	48660	41870
0,09404	0,0688	4320	47320	42250
0,09404	0,0904	4320	47320	40490
0,11440	0,1056	4800	43210	39630
0,12510	0,1325	5400	44460	39310
0,14350		5880	42210	
0,15970		6440	41780	
0,17840		6960	40180	
0,19170		7560	40160	
0,21010		8040	39420	

DÉCHARGE DANS LES DIFFÉRENTS GAZ

Le 17 mai 1877, MM. de la Rue et Müller (2) ont constaté qu'aux pressions atmosphériques ordinaires, la longueur de l'étincelle, donnée par une pile dans différents gaz, décroît dans l'ordre où ces gaz sont énumérés ci-après : hydrogène, azote, air, oxygène, acide carbonique, l'hydrogène

(1) La force électro-motrice d'un élément au chlorure d'argent = 1,03 volt.

(2) *Proc. Roy. Soc.*, XXVI, 1877, p. 227.

donnant une décharge à peu près double de celle de l'air. L'influence de la nature du gaz sur la longueur de l'étincelle est un phénomène spécial, qui ne paraît lié ni à la densité du gaz, ni à sa viscosité mécanique. On peut désigner cette propriété particulière sous le nom de *viscosité électrique*, le rapport des distances explosives obtenues pour deux gaz mesurant le rapport de leurs viscosités électriques.

TUBES A VIDE (OU DE GEISSLER)

Quand la pression de l'air est inférieure à 15 pouces (0^m,38) de mercure, l'aspect de la décharge change considérablement. Tout le gaz contenu dans le tube devient lumineux, et, si on examine cette lumière au spectroscope, on reconnaît qu'elle donne le spectre caractéristique du gaz.

Si on continue de faire le vide avec une pompe à mercure, jusqu'à ce que la pression ne soit plus qu'une faible fraction de millimètre, tout le tube se remplit d'une lumière brillante dont la couleur varie avec la nature du gaz qui reste dans le tube.

Si des substances fluorescentes sont placées dans le tube, ou l'entourent; si, par exemple, une partie du tube passe dans une solution de sulfate de quinine, ou si une partie du verre est colorée avec de l'urane, elles reluisent avec leurs couleurs caractéristiques quand elles sont éclairées par la décharge électrique.

Dans ces « tubes à vide », les électrodes sont d'habitude formées de fils de platine ou d'aluminium passés à travers le verre, qui est ensuite fondu tout autour. Le platine est particulièrement convenable pour cet usage, parce que, sa dilatation étant à peu près la même que celle du verre, il ne s'en détache pas en refroidissant. Une petite ouverture

est laissée à un des bouts du tube, le verre est étiré en un tube capillaire et relié à une pompe à air de Sprengel.

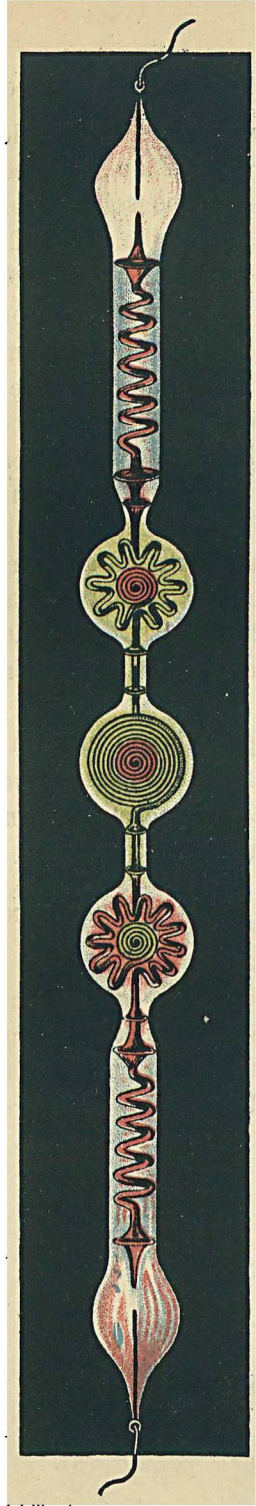
Quand le vide a été poussé aussi loin qu'il est nécessaire, on chauffe le tube capillaire à la flamme du chalumeau, jusqu'à ramollissement : alors on l'étire et on le ferme, opération qui est facilitée par la pression de l'air extérieur.

La planche XXXV représente un tube appartenant à l'auteur. La partie en spirale voisine de chaque bout traverse une solution de sulfate de quinine contenue dans un tube extérieur plus large. Les parties vertes sont colorées par de l'urane. Le rouge est la couleur naturelle de la décharge dans l'air raréfié. Le sulfate de quinine est incolore à la lumière du jour ; l'urane est aussi presque incolore. L'illumination de ces parties du tube par la décharge montre que celle-ci est très riche en radiations spectrales ultraviolettes, car ce sont ces radiations qui produisent la fluorescence.

On a remarqué qu'une seulement des deux boules qui terminent le tube est fortement illuminée ; c'est celle qui est reliée à l'électrode négative. Si on renverse le courant, c'est l'autre boule qui est illuminée.

EFFET DES AIMANTS

On a reconnu que la décharge à travers le gaz raréfié est attirée et repoussée par un aimant, de la même manière qu'un fil traversé par un courant ; les seules différences que l'on observe sont dues à ce que le fil est rigide et la décharge flexible.



Imp. FRALLERY

GORDON. Électricité.

Pl. XXXV — Tube à vide rendu fluorescent par l'Urané et le Sulfate de Quinine

Publié par J.-B. BAILLIÈRE ET FILS, à Paris.

CHAPITRE XXXV

STRIES

On a remarqué que, si le tube à vide présente des parties étroites, comme, par exemple, lorsqu'il a la forme de la figure 210, le courant de lumière n'est plus continu dans la partie étroite, mais il s'y partage en une série de disques lumineux.

Dans certaines circonstances, on a aussi observé ces dis-



FIG. 210.

ques dans des tubes larges. On les appelle des « stries » ou stratifications, et on ne connaît pas encore très bien leur cause. MM. Spottiswoode, de la Rue et Müller étudient ce sujet depuis quelques années, et presque tout ce que l'on en sait aujourd'hui est dû à leurs travaux ainsi qu'à ceux de M. Gassiot (1).

(1) Le phénomène de la stratification produite par les décharges électriques a été signalé d'abord par M. Abria, en 1843. En opérant avec la décharge d'une bobine d'induction, il obtint, dans un tube renfermant de l'air à la pression de 2 millimètres, une aigrette qui partait du pôle positif (une boule) et n'arrivait pas tout à fait jusqu'au pôle négatif (une pointe), où se trouvait un intervalle obscur. « De plus, dit M. Abria, cette flamme ou aigrette qui part du pôle positif présente, notamment à sa partie supérieure (en supposant la pointe négative en haut), des zones alternativement obscures et lumineuses. Ces

La grande bobine de M. Spottiswoode, déjà décrite (vol. II, p. 108), a été construite spécialement pour l'étude des stries; mais elle n'a été terminée que dernièrement et il faut attendre encore un peu les importantes découvertes que son emploi ne peut manquer d'amener. Voici le résumé de ce que nous savons pour l'instant sur ce sujet :

EXPÉRIENCES DE GASSIOT

Le 24 mai 1859 (1), M. Gassiot annonça à la Société Royale qu'il n'est pas nécessaire d'employer la bobine d'induction pour produire des stries. Il reconnut qu'une « pile à eau » de 3520 éléments isolés donne une succession d'étincelles entre deux disques de cuivre écartés de $1/8$ de pouce ($3,2^{mm}$). Si ses pôles sont reliés à un « tube à vide d'acide carbonique », dont les électrodes sont éloignées de 2 pouces environ ($5,08$ centim.), on obtient une décharge stratifiée. On observe aussi les stries en employant une pile de 400 éléments de Grove.

VIDES D'ACIDE CARBONIQUE

On obtenait des vides d'acide carbonique (2) de la façon

zônes sont concaves vers la boule quand la pointe (négative) est rapprochée de cette dernière; elles deviennent convexes vers la boule lorsque la pointe en est très écartée. » (*Ann. de chim. et de phys.*, vol. VII, p. 447.)

Sir William Grove les observa de son côté en 1852; puis M. Gassiot les étudia, à l'aide d'une bobine d'induction d'abord, puis au moyen d'une pile à potentiel moins élevé que celle qu'emploient MM. de la Rue et Müller. Enfin, M. Spottiswoode poursuit actuellement des recherches analogues par l'emploi d'une bobine d'induction et de la machine de Holtz. (De la Rue et Müller, *Phil. Trans.*, vol. CLXIX, p. 155.) J. R.

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. X, p. 36.

(2) Carbonic acid vacua; *Phil. Trans.*, 1859, p. 137; et Bakerian lecture, *Phil. Trans.*, 1858, p. 1.

suivante : Un tube ouvert aux deux bouts est relié d'un côté à une pompe de Sprengel, de l'autre à un récipient plein d'acide carbonique. On met dans le tube un peu de potasse caustique. Quand tout l'air a été remplacé par de l'acide carbonique, on scelle le bout du tube voisin du récipient, on fait le vide aussi complètement que possible et on scelle l'autre bout. Si alors on chauffe la potasse caustique, elle absorbe en refroidissant presque tout le gaz restant, et on obtient un vide très parfait.

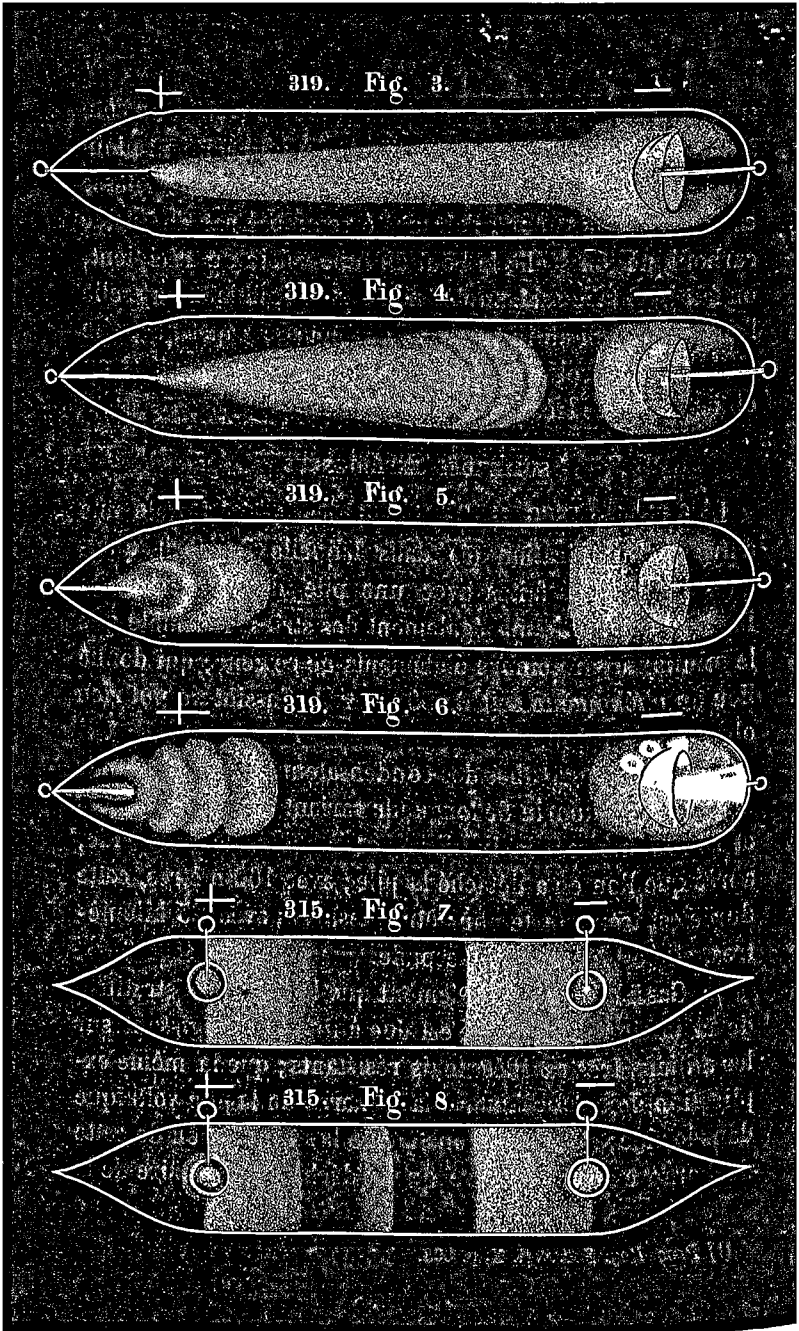
SUITE DES EXPÉRIENCES

Le 6 février 1860, M. Gassiot fit à la Société Royale une autre communication (1) dans laquelle il décrit quelques expériences faites avec une pile de 512 éléments Daniell, qui lui donna également des stries. Il semble que le minimum du nombre d'éléments de ce genre qui donne lieu au phénomène soit de 500, car M. Gassiot ne put rien observer avec 480.

Si on relie aux tubes des condensateurs formés de bouts de câble sous-marin de longueur variant entre 100 mètres et 25 000 mètres, la lumière persiste dans le tube vide, après que l'on en a détaché la pile ; avec 100 mètres, cette durée est trop courte pour être mesurée ; avec 25 kilomètres, elle est d'une demi-seconde.

M. Gassiot conclut finalement que la décharge stratifiée de la bobine d'induction est due à une force agissant sur les milieux très raréfiés, mais résistants ; que la même explication doit s'appliquer à la décharge de la pile voltaïque dans le vide ; que le fait constaté de la stratification de cette décharge conduit à croire que la décharge ordinaire de la

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. X, p. 393.



PL. XXXVI. — Tubes à vide de Gassiot.

pile voltaïque n'est pas continue, mais intermittente, et qu'elle consiste en une série de pulsations d'intensité plus ou moins grande, suivant la résistance des éléments chimiques ou métalliques de la pile ou du milieu conducteur à travers lequel se fait la décharge (1).

Le 11 décembre 1862, M. Gassiot annonça que le nombre et la position des stries se modifient quand on change la résistance du circuit (2).

Les planches XXXVI et XXXVII représentent quelques-unes des apparences observées dans trois tubes différents, suivant que la potasse était chauffée ou refroidie, et quand on changeait la résistance du circuit.

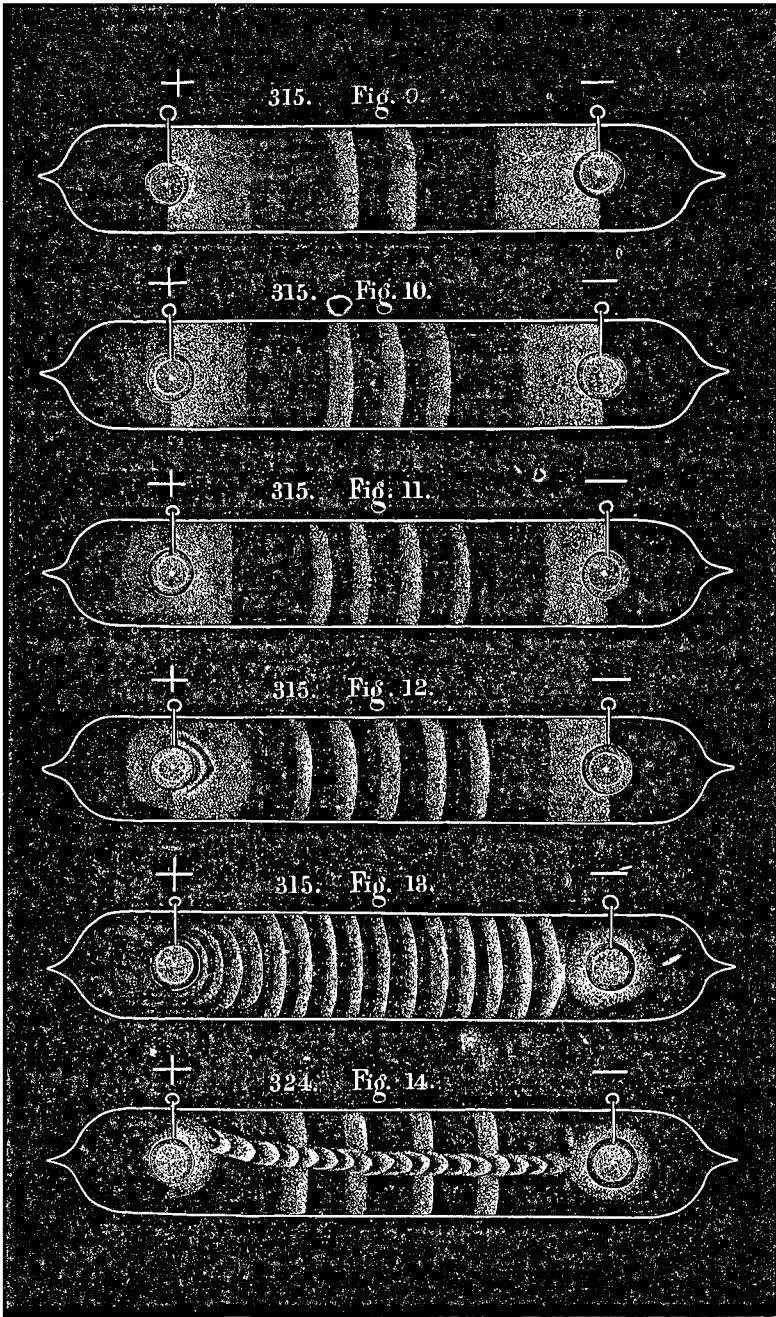
M. Gassiot a reconnu que, si la pression dans le tube est très basse, la décharge préfère traverser une longueur même plus grande d'air à la pression atmosphérique. A la fin de son mémoire, M. Gassiot dit : « Les bandes noires ne pourraient-elles pas être les nœuds d'ondulations dus à des impulsions semblables provenant de décharges positives et négatives? Les stratifications lumineuses que nous obtenons dans le circuit fermé du fil secondaire d'une bobine d'induction et dans le circuit d'une pile voltaïque ne seraient-elles pas l'image des pulsations qui passent le long du fil de la bobine dans le premier cas, à travers la pile dans le deuxième cas, pulsations produites probablement par l'action de la décharge le long des fils? »

EXPÉRIENCES DE DE LA RUE, MÜLLER ET SPOTTISWOODE

Le 8 avril 1875, MM. de la Rue, Müller et Spottiswoode

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. X, p. 404.

(2) *Ibid.*, vol. XII, p. 329.



PL. XXXVII. — Tubes à vide de Gassiot.

lurent un mémoire (1) contenant la description des expériences faites avec 1080 éléments de la pile au chlorure d'argent. (V. vol. I, p. 443.)

On avait employé différents condensateurs : l'un d'eux était formé de 318,5 mètres de fil ; les autres, de feuilles d'étain. On reconnut que les tubes qui ne donnaient pas

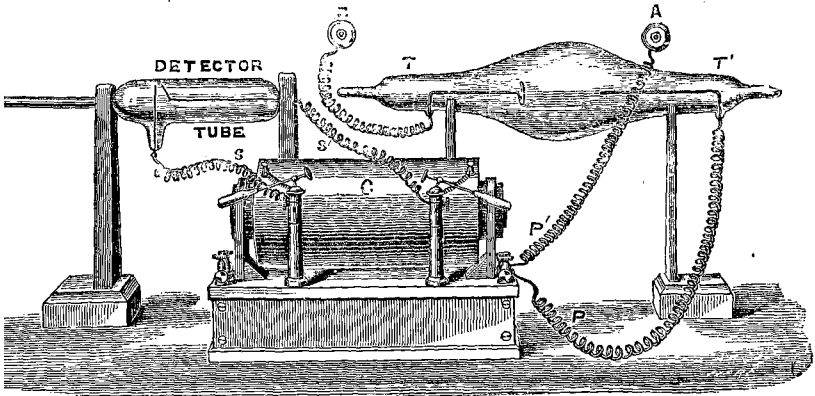


Fig. 211. (Detector = Indicateur.)

de stratifications avec la pile seule en donnaient aussitôt que l'on ajoutait un condensateur.

Les expérimentateurs furent ainsi amenés à penser que peut-être les stratifications étaient dues à des variations dans le courant de la pile, et ils constatèrent qu'il en était ainsi. Voici le moyen employé pour s'en assurer :

Le fil primaire d'une petite bobine d'induction (sans interrupteur), avec ou sans noyau de fer, était introduit dans le circuit du tube à vide (fig. 211 et 212).

Un autre petit tube à vide, V_2 , était attaché au fil secondaire. Or, nous savons que, tant qu'un courant constant

(1) *Ibid.*, vol. XXIII, p. 356.

traverse le fil primaire, il n'y a pas d'effet produit dans le fil secondaire : mais, à chaque variation, un courant sera induit dans ce dernier. Dans ces expériences, on a reconnu que, toutes les fois que la décharge était stratifiée dans le premier tube à vide, V , le second tube, V_2 , était illuminé. La figure 212 montre la disposition.

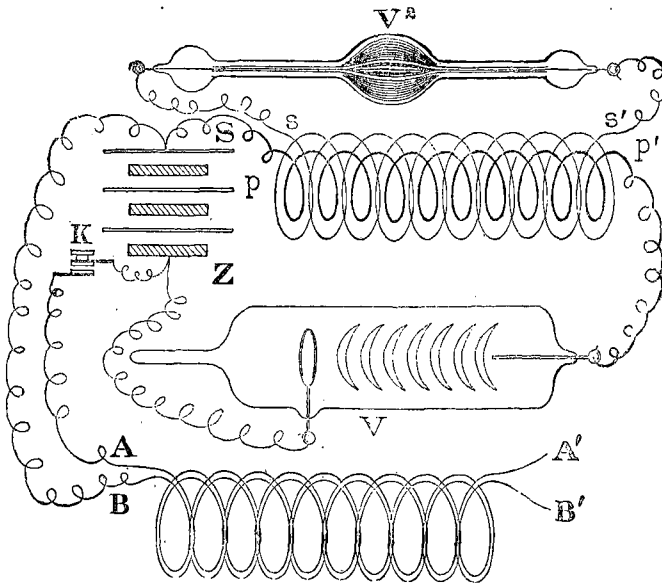


FIG. 212.

SZ est la pile.
 V le tube à vide primaire.
 PP' la bobine primaire.

AA' BB' le condensateur.
 SS' la bobine secondaire.
 V² le tube à vide secondaire.

On comprend que le tube secondaire était employé uniquement comme le moyen le plus commode pour découvrir et évaluer les courants dans le circuit secondaire.

Je ne sais si l'on a essayé de supprimer le tube à vide dans le circuit primaire : je crois que, si on l'eût fait, on n'aurait plus eu d'illumination dans le tube secondaire.

S'il en était ainsi, cela prouverait, non seulement que les stratifications sont dues aux variations du courant primaire, mais encore que ces variations mêmes se produisent dans le tube primaire, sans doute par suite de quelque mouvement élastique du gaz raréfié, analogue aux oscillations verticales d'un poids que l'on soulève au moyen d'une corde élastique.

EXPÉRIENCES DE SPOTTISWOODE

Le 10 juin 1875, M. Spottiswoode (1) rendit compte de quelques expériences faites avec « le haut interrupteur » ou, comme il préfère l'appeler maintenant, « l'interrupteur rapide » décrit au vol. II, p. 105, fig. 205 et 206. Cet instrument lui permettait d'obtenir, avec une bobine d'induction, des effets permanents dont on était aussi maître que si on eût opéré avec une pile.

Dans ce mémoire, M. Spottiswoode dit :

« Avec un pareil interrupteur fonctionnant bien, on peut noter plusieurs phénomènes : en premier lieu, dans un grand nombre de tubes (et surtout avec les hydro-carbures), les stries, au lieu d'être de forme arrétée et aplatie, de distribution irrégulière et de position variable, avaient un contour doux et arrondi, et leurs intervalles étaient équidistants et d'autant plus stables que l'interrupteur était plus régulier. Ces résultats doivent être attribués, je crois, à la régularité plus qu'à la rapidité des vibrations. Ce qui confirme cette supposition, c'est que la note de l'interrupteur peut changer (comme il arrive quelquefois) et causer ainsi un trouble momentané dans la stratification, mais la nouvelle note donne lieu à une série de stratifica-

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. XXIII, p. 455.

tions aussi fixes que les premières; il y a plus, on entend souvent, en même temps que la note pure de la lame vibrante, un son strident qui indique qu'il se produit des contacts de deux périodes distinctes; et néanmoins, si ce son strident est régulier, les stries restent fixes. D'autre part, à tout changement brusque dans le jeu de l'interrupteur (qui se traduit généralement par un changement dans le son), correspond toujours un changement dans les stries.

» Il est difficile de décrire l'extrême délicatesse de cette sorte d'interrupteur (*high break*). Il suffit de tourner de 2 ou 3 degrés une vis, dont la révolution élèverait ou abaisserait la pointe de platine de 0,635 de millimètre, pour produire le phénomène ou le faire disparaître entièrement. Il suffit aussi de tourner de même une des vis qui forment le pied du support de l'interrupteur pour régler ou fixer les stries; une légère pression du doigt sur le milieu du socle d'acajou, rigide en apparence, ou sur la table sur laquelle est posé l'interrupteur suffit pour agir sur les stries.

» Les décharges précédemment décrites sont généralement (quoique pas toujours) celles produites par le contact de rupture; mais il arrive souvent, surtout quand on entend le bruit strident, que le courant de fermeture est assez fort pour produire une décharge visible. Cela arrive avec l'interrupteur ordinaire aussi bien qu'avec le rapide. Mais, dans ce dernier cas, le double courant présente cette particularité remarquable que les stries formées par un courant sont disposées de façon à remplir exactement les intervalles des stries de l'autre courant et que toute perturbation qui affecte la série de stries due à un courant affecte de même, en ce qui regarde la position absolue dans l'espace, la série due à l'autre courant, en sorte que

la double série se meut (si tant est qu'elle se meuve) comme une masse solide ou élastique. Ce fait paraîtra encore plus remarquable si nous considérons, comme il est aisé de l'observer dans un miroir tournant, que ces courants sont alternatifs non seulement en direction, mais aussi en durée, et qu'aucun d'eux ne peut se produire avant que le précédent n'ait disparu complètement. Il faut noter aussi que cette association des stries n'est pas détruite, lors même que les deux courants sont plus ou moins séparés vers les extrémités opposées du tube par la présence d'un pôle magnétique. Il semble toutefois que, dans ce cas, les stries d'un des courants tendent à avancer sur les positions des stries du courant inverse, donnant à toute la colonne une apparence de torsion. Or, comme il n'y a pas trace, dans mes observations du moins, de cette association des décharges alternatives quand elles sont produites par l'interrupteur ordinaire, il semble que nous soyons amenés à cette conclusion qu'une décharge stratifiée laisse, en finissant, et pendant une durée très-courte, les gaz dans un état de distribution favorable à l'établissement d'une stratification semblable, s'il vient à se produire une autre décharge de même sens ou de sens contraire. L'explication du fait que les stries des décharges alternatives occupent des positions alternées et non semblables n'est pas aisée et exigerait sans doute une connaissance de la nature des stries plus complète que celle que nous possédons pour le moment.

« La colonne de stries qui occupe une grande partie du tube, du pôle positif au pôle négatif, a été décrite jusqu'à présent comme immobile, aux perturbations près qui sont causées par des irrégularités de l'interrupteur. Mais souvent la colonne peut prendre un mouvement général ou « flux »

partant du pôle positif ou se dirigeant vers ce pôle, que nous appellerons flux direct ou rétrograde. M. Gassiot avait déjà observé dans quelques tubes un phénomène analogue avec sa grande pile; mais je ne connais pas les circonstances exactes dans lesquelles il s'était produit. On peut régler ce flux, à la fois en vitesse et en direction, en introduisant des résistances dans le circuit, ou en plaçant le tube dans un champ magnétique. La résistance peut être introduite soit dans le circuit primaire, soit dans le circuit secondaire. Pour la première disposition, j'ai employé avec avantage une série de bobines de résistance complétées par un rhéostat. Pour le circuit secondaire, aussi bien que pour la machine de Holtz, j'ai fait usage d'un appareil à réglage délicat, imaginé et construit par mon aide, M. P. Ward, dont l'intelligence et l'habileté m'ont été d'un grand secours dans toutes ces recherches. En quelque endroit que l'on introduise la résistance, la loi suivante paraît établie par un grand nombre d'expériences diverses : les stries étant primitivement stationnaires, une augmentation de résistance produit un flux direct, et une diminution de résistance un flux rétrograde. J'ai trouvé qu'une variation dans le circuit primaire, de 3 ou 4 ohms en général, de 1 ou 2 ohms dans des circonstances favorables, suffit pour produire cet effet. Mais comme un changement dans le courant non seulement affecte directement la décharge, mais encore réagit sur l'interrupteur, le phénomène peut se trouver masqué par des causes indirectes. Ces dernières, en tant qu'elles dépendent d'un changement subit de résistance, peuvent être diminuées par l'emploi du rhéostat; mais quand les stries sont assez sensibles pour que l'on puisse se servir de ce réglage délicat, quelques précautions sont nécessaires pour assurer l'unifor-

mité parfaite du courant et éviter les perturbations dues à des contacts inégaux dans le rhéostat lui-même.

» Lorsque les stries sont en mouvement, elles gardent leurs distances respectives et leur nombre ne présente ni augmentation ni diminution. Généralement, une ou deux restent attachées d'une façon permanente à l'électrode positive ; à mesure que la colonne mobile avance ou recule, la strie qui est en avant diminue d'éclat jusqu'à ce qu'après avoir parcouru une longueur moindre que l'intervalle de deux stries, elle se perde dans l'obscurité. C'est l'inverse qui se produit à la queue de la colonne. A mesure que la dernière strie s'éloigne de sa position première, une nouvelle strie, d'abord faible et ombrée, apparaît en arrière à une distance égale à l'intervalle commun des autres stries : son éclat augmente jusqu'à ce qu'ayant atteint la position occupée d'abord par la dernière strie quand la colonne était au repos, elle soit devenue aussi brillante que les autres. La vitesse du flux peut varier beaucoup : le flux est quelquefois assez lent pour que l'on puisse observer dans toutes leurs phases l'apparition et la disparition des stries extrêmes ; il peut être assez rapide pour que l'on ne distingue plus les différentes stries et que le tube paraisse illuminé par une décharge continue. Dans la plupart des cas, le véritable caractère de la décharge et la direction du flux peuvent se distinguer aisément au moyen du miroir tournant. Dans quelques tubes, surtout dans ceux dont la longueur est grande relativement au diamètre, toute la colonne ne présente pas la même phase de flux ; une partie peut être fixe, tandis qu'une autre est en mouvement ; ou même deux portions contiguës peuvent être animées de mouvements en sens inverses. Cela se voit aussi dans les tubes larges, où les stries paraissent

en général plus mobiles que dans les tubes étroits. Dans tous les cas, ces nœuds ou points de jonction du flux conservent leurs positions dans les mêmes conditions de pression et de courant; il semble donc que, dans les mêmes conditions et dans un tube donné, la colonne se divise toujours en segments de flux semblables.

» Souvent ces nœuds disparaissent sous l'influence d'un pôle magnétique. Ainsi, si le premier segment, compté à partir de l'électrode positive, est fixe, et si le second a un mouvement rétrograde (c'est-à-dire de — vers +), un pôle magnétique d'intensité convenable, approché du bout, le plus éloigné, du deuxième segment, arrête son mouvement et rend la colonne immobile dans toute sa longueur. En augmentant la force de l'aimant, ou en le rapprochant davantage du tube, toute la colonne prendra un mouvement direct ou en avant. »

Les phénomènes de flux, et d'autres tout aussi intéressants, peuvent être produits avec la machine de Holtz.

MIROIR TOURNANT

Le 18 mai 1876, M. Spottiswoode (1) a rendu compte de quelques expériences faites sur les stries avec un miroir tournant. L'interrupteur était une tige plongeant dans un amalgame de platine et mue par une came fixée sur l'axe du miroir : de la sorte, on était sûr que le contact était rompu au moment où l'étincelle était au centre du champ de vue. L'axe du miroir était vertical, et la lumière du tube, également vertical, passait à travers une fente verticale.

Avec cette disposition, si le miroir était au repos, on de-

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. XXV, p. 73.

vait y voir une décharge continue sous la forme d'un trait lumineux vertical, de largeur égale à la largeur de la fente ; une décharge stratifiée devait apparaître comme une ligne verticale brisée dont les parties brillantes correspondraient aux positions des stries.

Faisons maintenant tourner le miroir : une décharge continue et non brisée présentera l'apparence d'une nappe lumineuse ; et une décharge continue stratifiée, celle d'une série de barres horizontales dont l'épaisseur est égale à la longueur des stries. Une décharge intermittente non brisée donnera lieu à une série de traits verticaux continus ; et une décharge intermittente stratifiée, à une série de lignes verticales brisées, formant des bandes horizontales dont l'épaisseur sera égale à la longueur des stries. Le rapport des épaisseurs des lignes verticales à celles des espaces verticaux est évidemment égal au rapport des durées des décharges aux durées des intervalles compris entre les décharges successives.

Lorsque la distance du tube au miroir et la vitesse de rotation sont connues, on peut calculer la durée absolue de chaque décharge.

Fixons maintenant notre attention sur un point lumineux et supposons qu'il se meuve verticalement de haut en bas.

Nous verrons une ligne en diagonale, dont l'inclinaison dépend du rapport de la vitesse du point à la vitesse du miroir (1).

Si le point était constamment lumineux, cette ligne en diagonale serait continue ; s'il ne l'était que par intermittences, elle serait brisée.

(1) Si α est l'angle que fait cette ligne avec l'horizontale, v la vitesse du point lumineux, θ la vitesse angulaire du miroir, et r la distance du tube à l'axe du miroir, on a : $\text{tang } \alpha = \frac{v}{r\theta}$.

On voit ainsi qu'au moyen du miroir on peut mesurer la durée des décharges, leurs intervalles et la vitesse du mouvement des stries; et si, comme il arrive souvent, plusieurs décharges discontinuës se confondent pour en former une

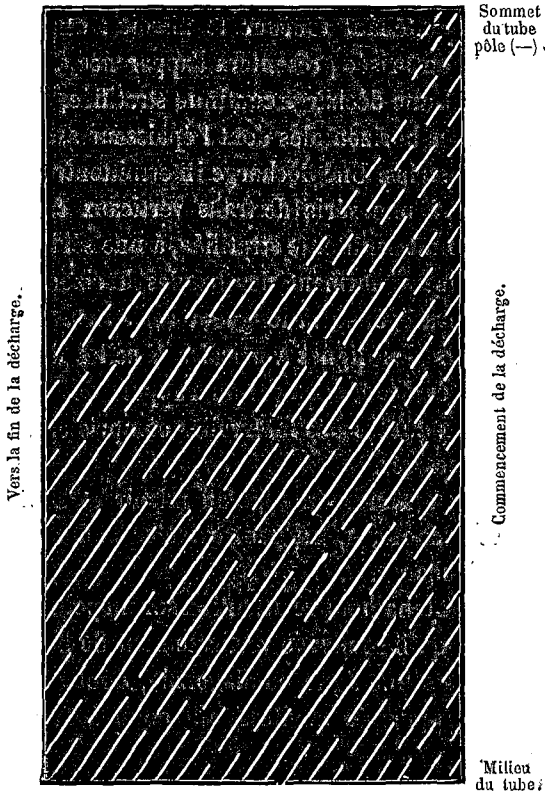


FIG. 213.

seule d'apparence continue, le miroir la résoudra en ses éléments constitutifs.

La figure 213 représente l'aspect dans le miroir d'un tube à acide carbonique. Le commencement de la décharge est

à droite (c'est-à-dire que le miroir tournait en sens inverse des aiguilles d'une montre) et le pôle négatif est en haut. Le pôle positif est bien plus bas que la limite du dessin, qui représente ainsi la partie supérieure du tube pendant une décharge complète de la bobine. On voit que la décharge commence par une série parfaitement régulière de stries animées d'un mouvement uniforme de haut en bas. Après un court intervalle d'obscurité, il se produit une deuxième série moins régulière, mais de durée un peu plus longue que la première.

On voit qu'à la partie supérieure du tube l'éclat lumineux disparaît rapidement, mais près du milieu les décharges se répètent fréquemment.

Au commencement de la région de longue durée, nous voyons que chaque strie se meut vers le bas pendant peu de temps, puis s'éteint et se trouve remplacée par une autre strie partant à peu près du même point. Plus bas, le mouvement de chaque strie se prolonge plus longtemps; elles ne se forment ni ne se détruisent plus aux mêmes points fixes du tube. Lorsqu'on regarde le tube, il présente à l'œil « des stries semblables à de minces écailles et scintillantes, avec une légère tendance à former des flocons vers la tête de la colonne ».

Chacune de ces stries est, comme on voit, composée des éléments formant sur la figure des bandes à peu près horizontales, chaque bande étant un groupe de stries élémentaires. La courbure de ces bandes montre le mouvement propre de ces stries composées; si elle est tournée vers le bas, les stries marchent du négatif au positif; si elle se relève vers le haut, le mouvement est en sens inverse du précédent.

La figure 214, qui représente un autre tube du même genre, montre plus clairement le mouvement propre des stries composées.

Il est d'abord dirigé vers le bas, puis vers le haut ; mais,

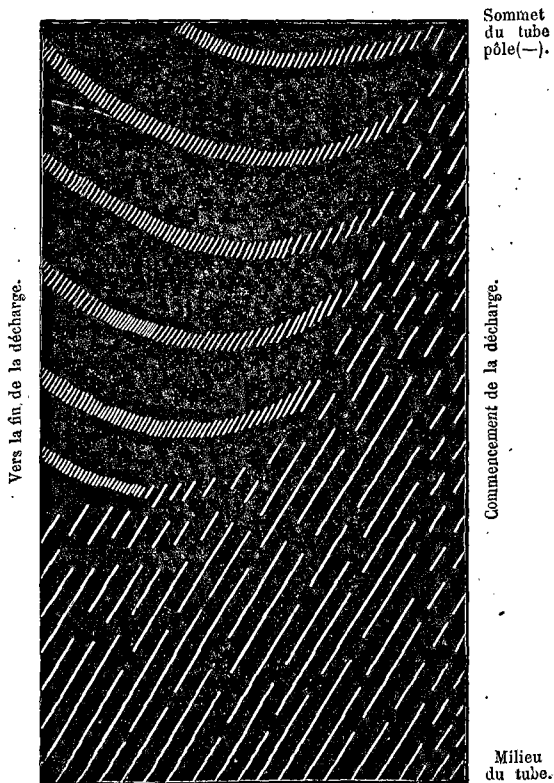


FIG. 214.

par l'inclinaison des lignes qui représentent les stries élémentaires, nous voyons qu'en réalité le mouvement propre est tout entier du $-$ au $+$ et que l'apparence d'un mouvement inverse des stries composées est due à ce que cha-

cune des nouvelles stries élémentaires se forme un peu au-dessus de la précédente.

La figure 215 représente la décharge dans un tube d'hydrogène, de forme conique, dont le diamètre varie d'une dimension capillaire à un demi-pouce (1^e,27), le bout capillaire étant au bas du tube. L'électrode positive est en haut et par suite le courant dans cette figure a un sens inverse du courant dans les figures 214 et 215. Ce tube est

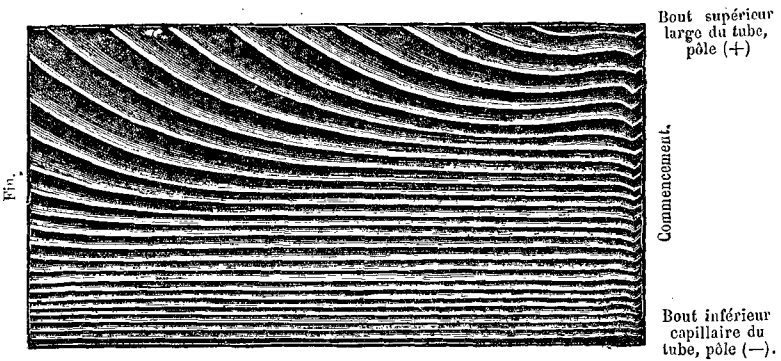


FIG. 215.

particulièrement intéressant en ce qu'il montre l'influence du diamètre sur la vitesse du mouvement propre. Plus le tube est large, plus les stries paraissent se mouvoir librement. On voit aussi que cette décharge, quoique stratifiée, est pratiquement continue.

Voici les conclusions auxquelles « les expériences précédentes paraissent conduire », d'après M. Spottiswoode (1) :

« 1^o Les stries fixes, en forme d'écailles minces, quand elles présentent des contours arrêtés et faciles à distinguer, durent peu, ou bien ont un mouvement propre très lent, ou bien ont à la fois les deux caractères.

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. XXV, p. 81.

» 2° L'irrégularité apparente dans la distribution de ces stries, même pendant une seule décharge de la bobine, tient, non pas à une irrégularité effective dans leur arrangement, mais à l'inégalité de leur durée et à la différence des périodes auxquelles elles se renouvellent. En réalité, ces stries sont disposées à intervalles réguliers sur toute la longueur de la colonne. L'aspect scintillant que l'on y remarque d'habitude tient à de légères variations dans la position des stries élémentaires pendant les décharges successives de la bobine.

» 3° Le mouvement propre des stries élémentaires est celui qui leur appartient durant une seule décharge de la bobine. Il paraît généralement dirigé du pôle positif au pôle négatif : sa vitesse varie entre des limites étroites, elle croît avec le nombre des bobines employées ou avec la force électro-motrice du courant. Dans quelques tubes, elle paraît diminuer vers la fin de la décharge, et dans quelques cas très rares elle semble augmenter et diminuer alternativement pendant la durée d'une seule décharge.

» 4° Les stries floconneuses que l'on voit ordinairement dans les tubes à acide carbonique sont un phénomène complexe. Elles sont dues à une succession de stries élémentaires de courte durée, se renouvelant régulièrement. Les positions où elles se renouvellent déterminent le mouvement propre apparent des stries élémentaires. Si elles se renouvellent constamment aux mêmes points du tube, les stries floconneuses paraissent n'avoir pas de mouvement propre et demeurer fixes. Si elles se renouvellent en des points de plus en plus rapprochés du pôle positif, le mouvement propre sera le même que celui des stries élémentaires. Si elles se renouvellent en des points de plus en plus éloignés du pôle positif, le mouvement propre sera renversé.

» 5° Les autres circonstances restant les mêmes, la vitesse du mouvement propre varie avec le diamètre du tube. Ce phénomène a été très bien observé dans le tube conique. Dans les tubes construits pour l'analyse spectrale, le mouvement est très faible dans les parties capillaires et souvent considérable dans les parties plus larges.

» 6° D'une manière générale, la décharge dure plus longtemps dans les tubes étroits que dans les tubes larges. Dans les tubes destinés à l'analyse spectrale, les parties capillaires donnent un spectre s'étendant bien plus loin que celui qui est dû aux parties larges.

» 7° Dans la première période de son développement tout au moins, la décharge de la bobine paraît sujette à de grandes fluctuations dans son étendue. Dans tous les cas, il y a d'abord un fort éclat; bien qu'il apparaisse quelquefois comme une ligne brillante, il est en réalité, je crois; toujours stratifié. Il est aussitôt suivi d'un raccourcissement très rapide de la colonne. L'étendue de ce raccourcissement varie suivant les circonstances. Mais si, comme cela se présente souvent, la colonne s'étend beaucoup dans le bas du côté du pôle positif, on aperçoit une diminution correspondante d'intensité dans la lueur négative. La colonne de stries, après s'être relevée, est souvent sujette à des fluctuations semblables. Il y en a quelquefois quatre ou cinq qui se succèdent, d'étendue de moins en moins considérable, et qui n'atteignent qu'une petite distance au bas de la colonne de stries. Les lacunes dues à ces oscillations disparaissent alors, et les stries se suivent sans interruption, ou coupées à des intervalles irréguliers, jusqu'à la fin de la décharge.

» 8° L'effet du mouvement propre, pris en lui-même, est de raccourcir la colonne de stries. Mais, comme nous

l'avons vu, dans bien des cas les stries se renouvellent de temps en temps. La tête de la colonne présente à ce sujet les caractères les plus instructifs. Après que ces interruptions ont cessé, l'aspect général du champ est celui d'une série de lignes en diagonale, commençant aux points successifs qui forment la limite de la colonne aux intervalles de temps successifs. Si les points sont sur une horizontale, les stries se renouvellent aux mêmes points à intervalles réguliers, et la longueur de la colonne se maintient par un renouvellement périodique des stries, une strie nouvelle apparaissant à la tête de la colonne dès que la précédente a passé sur un intervalle obscur. Si la limite du champ illuminé s'élève, la longueur de la colonne augmente ; si elle descend, la colonne se raccourcit. Mais, dans chaque cas, les variations de la colonne se produisent par degrés réguliers et successifs et non pas irrégulièrement. Les intervalles des nouvelles stries entre elles et ceux qui les séparent des anciennes sont les mêmes que ceux des anciennes stries entre elles.

» 9° Le principal effet d'un changement dans la force électro-motrice paraît être un changement dans la vitesse du mouvement propre. Un changement dans la grandeur de la surface des plaques de la pile produit un changement correspondant dans la durée de la décharge totale, et sans doute aussi dans le développement de quelques détails secondaires des stries.

» 10° Lorsque le mouvement propre des stries élémentaires dépasse une certaine valeur, les stries semblent se confondre en une colonne continue de lumière où toute trace de stratification est perdue. Lorsqu'il en est ainsi, le miroir permet souvent de démêler les stries individuelles. Mais, comme il fallait s'y attendre, il y a des cas où le mi-

roir même ne suffit plus ; nous pouvons cependant supposer que la stratification existe toujours. Différentes expériences m'ont conduit à penser qu'un indice de la décharge stratifiée pourrait être tiré de la séparation de la décharge en deux parties, savoir : la colonne lumineuse qui s'étend à partir du pôle positif et la lueur qui entoure le pôle négatif avec un espace obscur interposé ; mais je ne puis rien affirmer de certain sur ce point. »

EXPÉRIENCES DE MM. DE LA RUE ET MÜLLER.

Le 23 août 1877, MM. Warren de la Rue et Hugo W. Müller communiquaient à la Société Royale un mémoire sur « la décharge électrique de la pile au chlorure d'argent », 1^{re} partie (1). La 2^e partie fut communiquée le 10 avril 1878 (2). Dans la première partie du mémoire, ils décrivaient la construction de la grande pile à chlorure d'argent (3), qui comprend maintenant (1880) 25 400 éléments. Les premières expériences faites avec cette pile étaient destinées à reconnaître si la décharge dans des tubes où le vide avait été poussé très loin est de la nature d'un courant proprement dit, ou si elle est disruptive comme la décharge dans l'air aux pressions ordinaires. A cet effet les observateurs s'arrangeaient pour faire passer la décharge de 2 400 éléments à travers un circuit formé d'un tube à vide et d'une grande résistance. On faisait varier cette résistance de façon à avoir un courant dont l'intensité variait de 1 à 135, mais on trouva que la différence de potentiel aux deux bouts du tube restait presque absolument constante. Or, d'après la loi de Ohm, le potentiel le long d'un conducteur décroît

(1) *Phil. Trans.*, part. I, vol. CLXIX, p. 55.

(2) *Ibid.*, part. I, vol. CLXIX, p. 155.

(3) *Voy.* vol. I, p. 443.

régulièrement, et, par suite, si le tube vide avait été un conducteur ordinaire, il y aurait eu une chute de potentiel uniforme tout le long du circuit formé par le tube AB et la résistance BC (fig. 216) et la ligne LMC aurait été droite de L en C; mais on trouva, en fait, que, de quelque façon que l'on fit varier l'inclinaison de la partie MC, l'inclinaison de

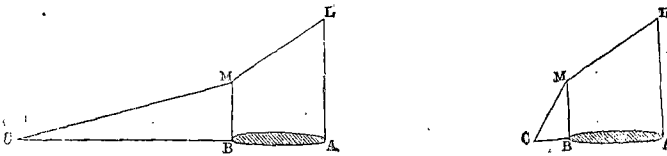


FIG. 216.

LM qui représente la chute du potentiel le long du tube, restait constante : ce qui prouve que la décharge n'est pas un cas de conduction proprement dite, mais que même aux plus basses pressions, elle reste *disruptive* (1).

MANIÈRE DE FAIRE LE VIDE.

Nous arrivons maintenant à la manière de faire le vide

(1) Hittorf (*Pogg. Ann.*, vol. CXXXVI, p. 1 et 197, 1869) a montré par diverses expériences que l'influence de la longueur du tube dépend du degré de raréfaction. Deux tubes dont les longueurs étaient dans le rapport de 12 à 1, et qui communiquaient ensemble, ont été placés parallèlement entre eux, les pôles réunis deux à deux, et un galvanomètre pouvait être introduit dans le circuit de l'un ou l'autre. A des pressions notables, la décharge passait seulement par la plus courte distance; mais à la pression de $0^m,5$ les intensités des deux courants n'avaient pas de différence appréciable.

D'après Schultz (*Pogg. Ann.*, vol. CXXXV, p. 249, 1868), la différence de potentiel nécessaire pour produire la décharge entre deux électrodes est sensiblement proportionnelle à la distance, lorsque la pression est celle qui exige la moindre différence de potentiel; mais, pour une pression plus faible, la différence de potentiel nécessaire à la décharge augmente rapidement et l'influence de la distance des électrodes devient bientôt inappréciable.

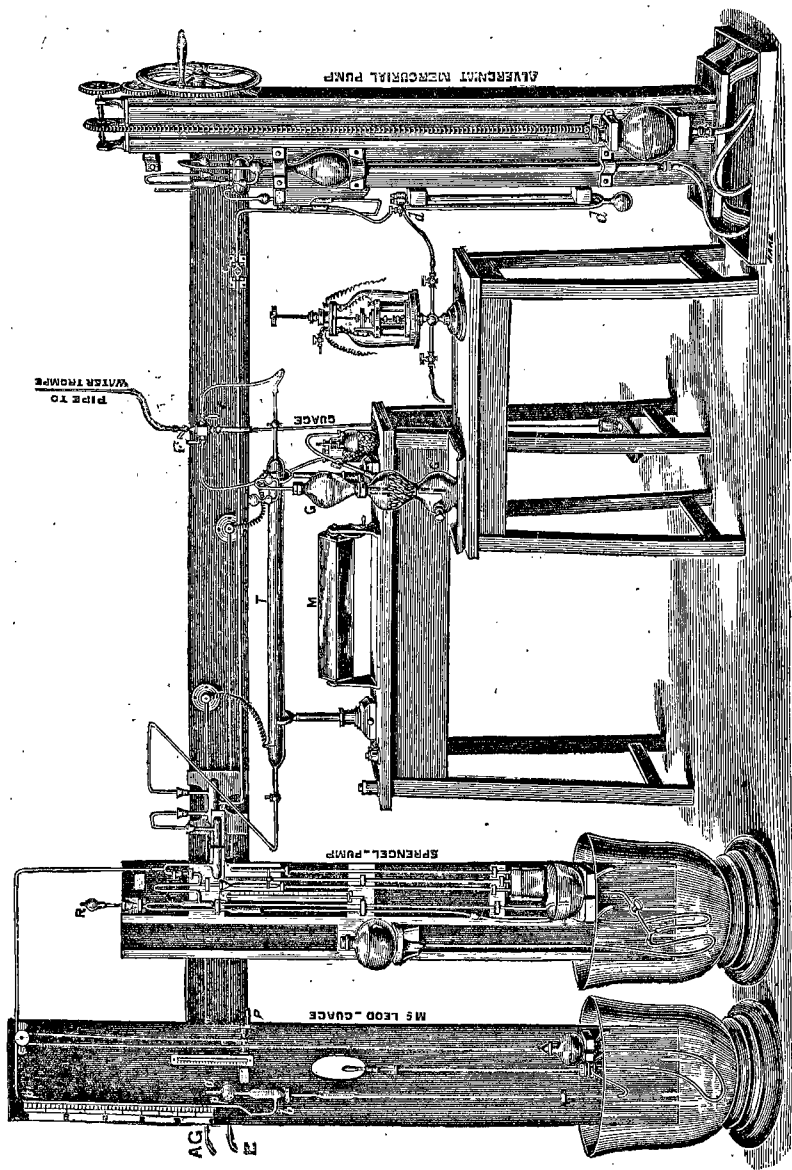
dans les tubes, de façon à reproduire à volonté les différentes phases des phénomènes. On a reconnu que, lorsqu'on a fait le vide dans les tubes, et qu'on les a scellés une fois pour toutes, le caractère des tubes change après le passage de quelques décharges, en sorte qu'il devient impossible de reproduire de cette façon les phénomènes sous leur première forme. On disposa alors les tubes de manière à pouvoir y faire passer les décharges pendant que l'on était en train d'y faire le vide. Lorsque l'on observait un phénomène particulier, on prenait note de la pression et, en revenant ensuite à cette pression, on pouvait reproduire le phénomène.

La planche XXXVIII est un dessin des pompes à air, etc., de M. de la Rue. La disposition comprend trois modes d'épuisement qui sont employés successivement à mesure que le vide devient plus parfait.

Le premier est une *trompe* à eau à haute pression d'Alvergniat : elle est reliée à la principale conduite à haute pression de la Compagnie des eaux du West Middlesex : le niveau de l'eau se trouve à 32 mètres, et le vide produit correspond à une pression barométrique de un demi-pouce (0,47 pouce = 12 millimètres).

Le tuyau relié à cette conduite est indiqué de la façon suivante sur la figure : il est attaché par un robinet à une pièce de jonction à quatre branches F munie de trois autres robinets communiquant : l'un, à un des bouts du tube T ; l'autre au dernier des flacons où se dessèche le gaz produit en GG, le dernier à un manomètre à mercure. L'autre bout du tube à vide T communique, par une pièce en Y, avec une pompe à mercure d'Alvergniat, à droite de la figure, et avec une pompe de Sprengel à gauche. Après que la *trompe* a fait son office, on emploie la pompe d'Alvergniat pour

A, la trompe à eau



Pompe à mercure d'Alvergnat.

Jauge de M^c Lead. Pompe de Sprengel.

Pl. XXXVIII. — Appareils de M. de la Rue pour faire le vide.

faire rapidement le vide, puis on la ferme par le robinet de verre C, le vide devant être complété par la pompe de Sprengel. Les auteurs ont obtenu par les *pompes seules*, dans des tubes de 32 pouces ($0^m,813$) de long et de 2 pouces ($0^m,051$) de diamètre, des vides de 0,002 millimètre de pression, représentant 2,6 millièmes d'atmosphère : ce vide est si parfait que le courant de 8 040 éléments ne passe plus. L'appareil était relié à une jauge manométrique du M^e Leod (1), qui permet d'évaluer des pressions de 0,00005 millimètre. Outre ce manomètre, les pompes d'Alvergny et de Sprengel ont chacune leur manomètre, que l'on peut lire à un millimètre près (2).

DISPOSITION DE L'APPAREIL

La planche XXXIX montre la disposition générale de l'appareil. AC est un commutateur rapide pour envoyer des courants alternativement dans les deux sens. K est une clef à inversion, construite spécialement en vue de donner

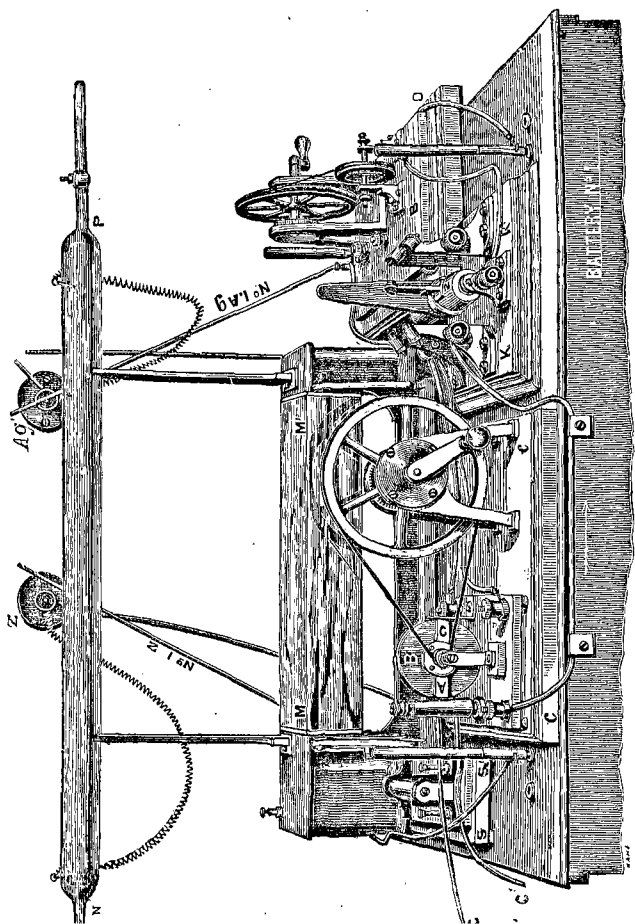
(1) (*Phil. Mag.*, août 1874.) Quand le réservoir de mercure est soulevé, une partie du gaz, à la même pression que celui qui est dans le tube, est interceptée en *b* et comprimée plus ou moins dans la petite chambre graduée *a*, au sommet de la boule, suivant que le gaz est plus ou moins raréfié. En même temps, le mercure monte dans la colonne de compression *p*, et sa hauteur donne le moyen de déterminer la pression du gaz dans le tube. Des tables ont été préparées pour donner à vue la valeur de la lecture.

[Voir dans les *Annales de Chimie et de Physique* la note de M. Bertin sur les machines à faire le vide et sur la jauge de M^e Leod, 5^e série, tome XIX, p. 231, février 1880.]

(2) Pour obtenir des vides poussés à leur dernière limite, on munit le tube à l'une de ses extrémités d'une chambre renfermant des substances absorbantes (éponge de palladium, charbon). Avec de l'hydrogène et une éponge de palladium, le vide obtenu ne laissait pas passer le courant d'une pile de 11 000 éléments. En absorbant de l'acide carbonique par la potasse, le vide fut assez parfait pour arrêter le courant de la même pile; mais, quand on fermait le circuit, il se formait un flux de lumière dans un sens, et pas en sens contraire.

CORDON. Électricité.

II. — 11



Pl. XXXIX. — Appareils de M. de la Rue.

un bon isolement avec la force électromotrice énorme dont on fait usage. Quand le manche est vertical comme sur la figure, il ne passe aucun courant.

En déplaçant le manche vers la droite ou la gauche, on envoie le courant dans les deux sens à travers le tube. BB est un interrupteur à roue pour produire des intermittences rapides. Z et Ag sont respectivement les pôles zinc et argent de la pile.

M (Pl. XXXVIII et XXXIX) est un miroir tournant, consistant en un prisme à quatre faces, monté sur un axe horizontal et muni d'une roue multipliant la vitesse : sur chaque face du prisme est monté un miroir. La réflexion du tube dans le miroir permet d'examiner si une décharge d'apparence nébuleuse est réellement formée de stries, s'il y a un flux de stries et la direction de ce flux alors que les stries peuvent paraître parfaitement fixes à l'œil.

On rend les observations plus faciles en couvrant le tube à sa partie inférieure d'un demi-cylindre de papier noir percé d'une fente longitudinale de $1/10$ de pouce ($2,54^{\text{mm}}$) de large. R (Pl. XXXVIII) est un radiomètre attaché à la pompe de Sprengel; *dd* un tube desséchant contenant des fragments de potasse, qui sert lorsqu'on introduit à travers la pompe d'Alvergnyat du gaz pris dans un réservoir.

Pour ne pas avoir de décimales, on exprime d'habitude les pressions en millionièmes d'atmosphères, que l'on écrit M.

$$1 \text{ millimètre de mercure} = 1315,789 \text{ M.}$$

$$1 \text{ M} = 0,00076 \text{ millims.}$$

Dans les expériences dont nous nous occupons, les pressions variaient de 2 0000 M à 3 M. Avec moins de 3 M, le courant de 11 000 éléments ne passait plus dans le tube 129.

Dans un tube à vide ordinaire, préparé pour donner les

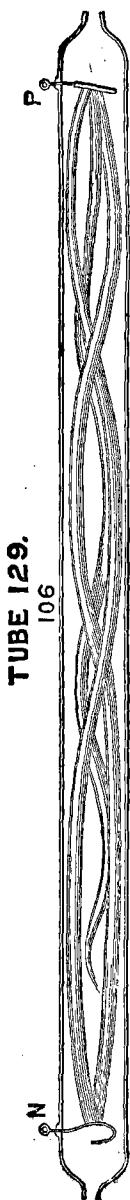


FIG. 217.

effets lumineux les plus beaux, le vide est de 2 à 4 millims., c'est-à-dire de 2000 M à 5000 M.

La puissance de la pile variait de 3000 à 11 000 éléments.

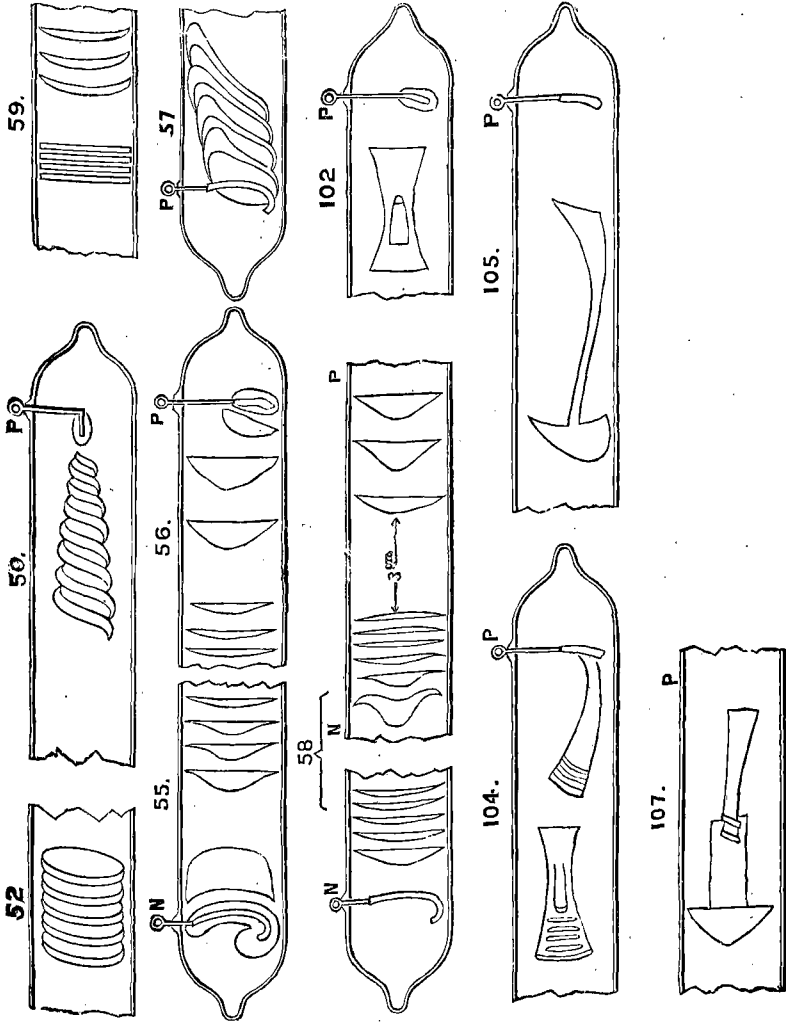
On a employé des tubes dont la longueur variait de 6 ou 7 pouces ($0^m,15$ ou $0^m,18$) à 3 pieds ($0^m,90$) et au moyen des pompes, on pouvait les remplir de différents gaz ainsi qu'on l'a décrit.

Les stries les plus belles et les plus merveilleuses ont été observées sous toutes sortes de formes étranges.

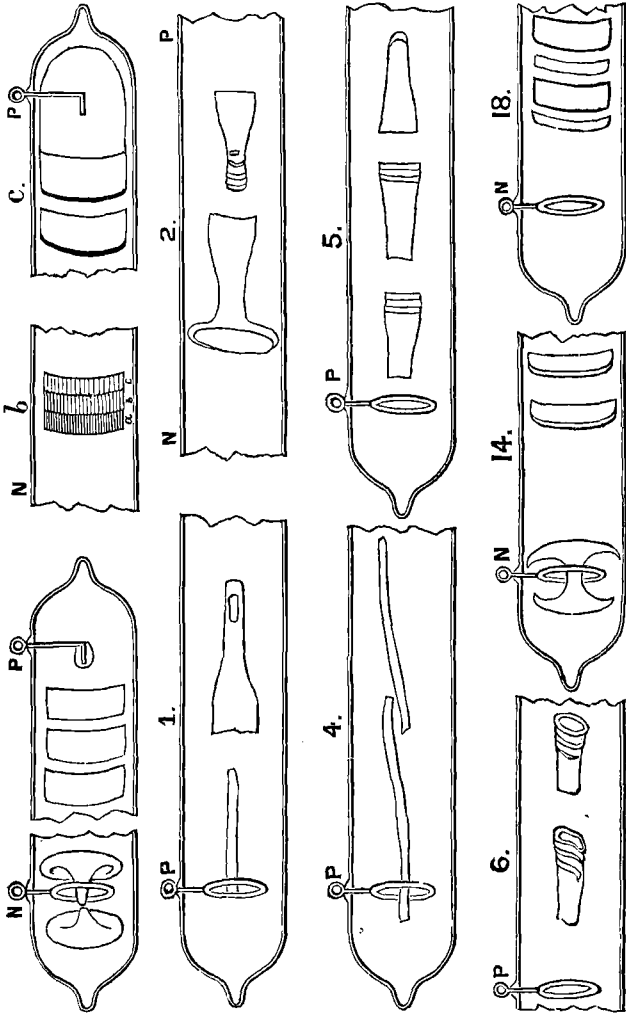
Il serait impossible, avec l'espace dont nous disposons, de donner des détails étendus sur les innombrables phénomènes distincts décrits dans le mémoire. On recommande au lecteur de les étudier dans les *Philosophical Transactions*. Nous avons reproduit toutefois le dessin de quelques-unes des formes les plus frappantes. Le tube 129 (fig. 217) avait 32 pouces de long ($0^m,81$), et 1,6 pouce ($0^m,04$) de diamètre. Ses électrodes étaient un anneau et un fil recourbé à angle droit dans la direction de l'axe du tube, tous deux en aluminium. Il contenait de l'hydrogène.

Les planches XL, XLI, XLII, représentent différents phénomènes observés avec ce tube à différents degrés de vide et avec des piles de forces différentes.

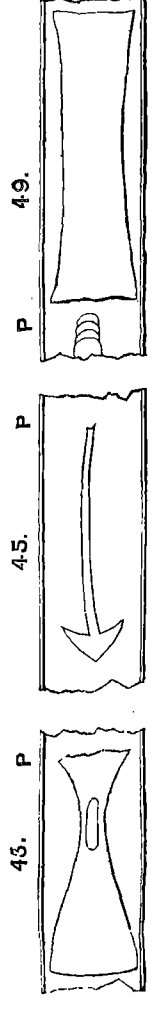
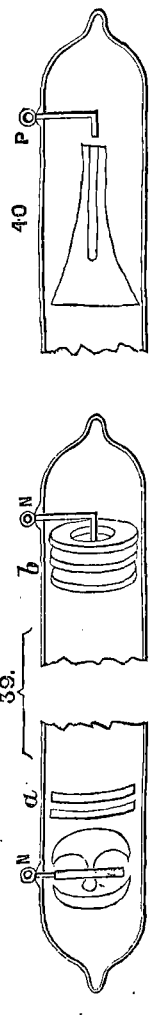
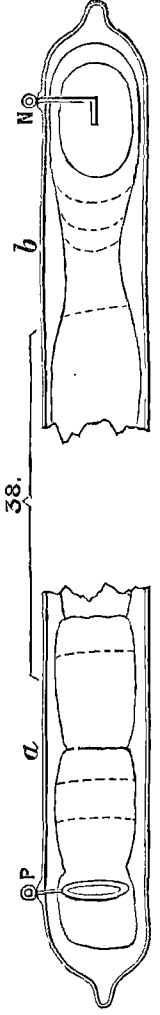
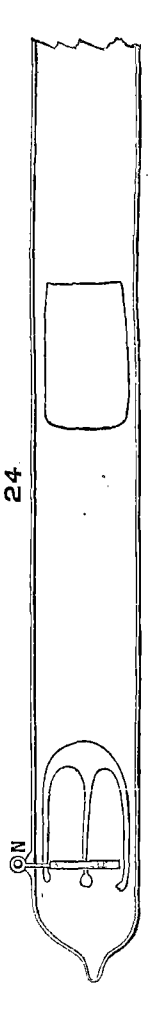
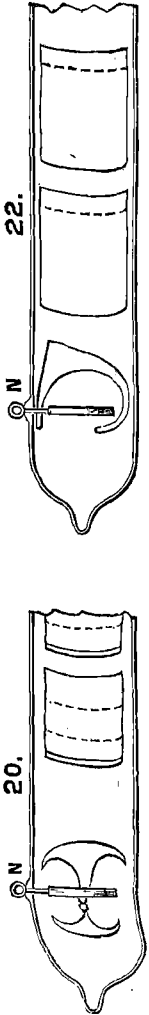
Ces figures, de formes curieuses, sont toutes des masses de lumière diversement



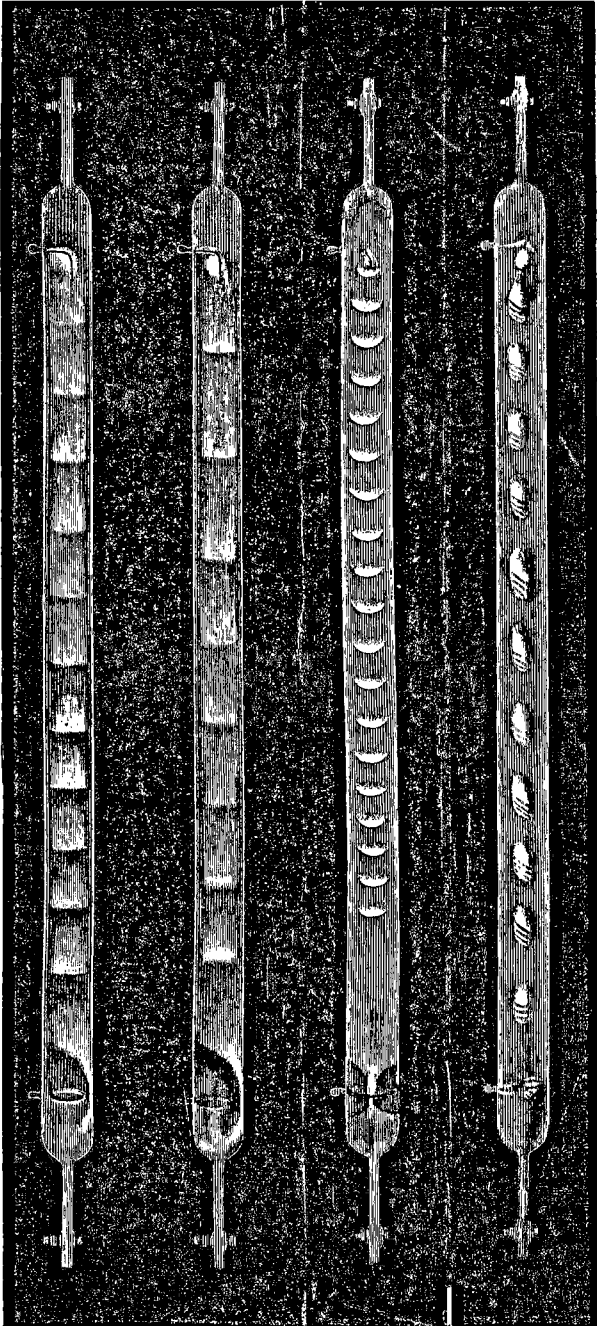
Pl. XL. — Sires de la Rue.



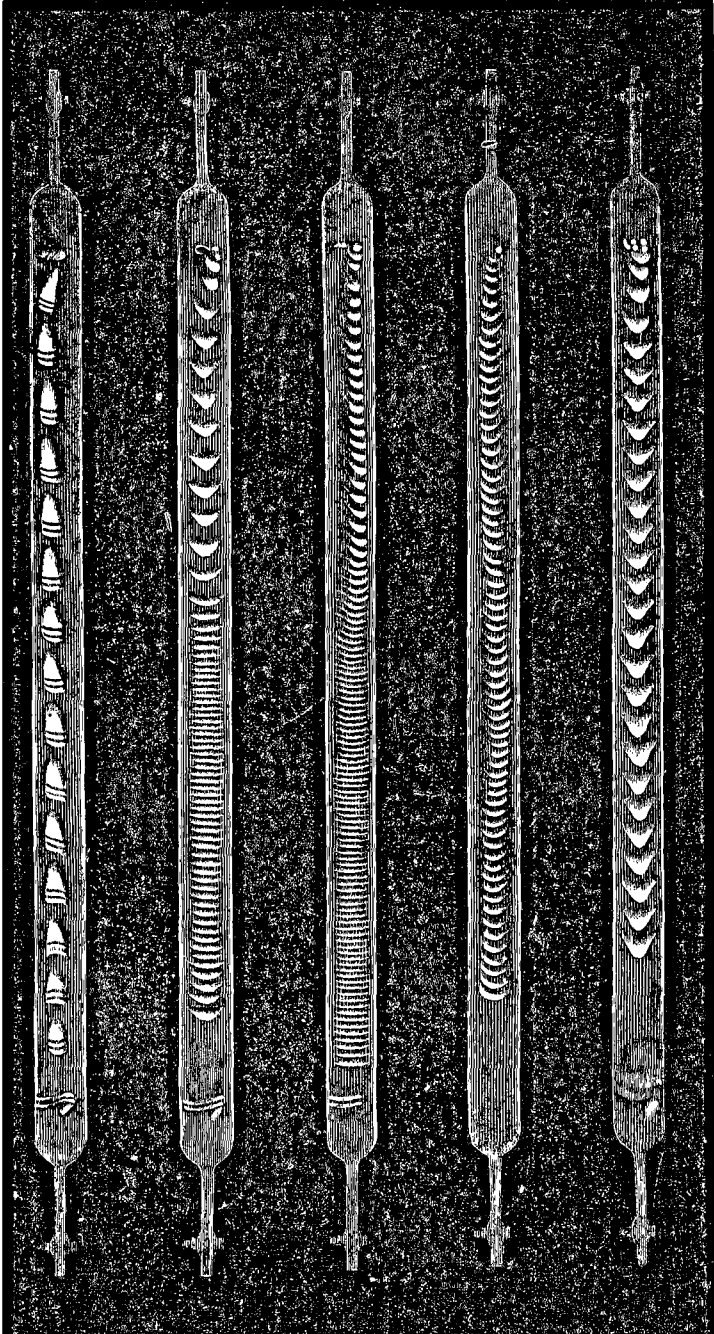
Pl. XII. — Stries de la Rue.



Pl. III. — Stries de la Rue.



Pl. XLIII. — Sries de la Rue.



Pl. XLIV. — Siries de de la Ituc.

colorées, des « entités lumineuses », comme les appellent les auteurs du mémoire. Quelquefois, elles sont en mouvement et quelquefois en repos.

Les planches XLIII, XLIV, XLV ont été gravées d'après des photographies prises sur les tubes eux-mêmes.

M. de la Rue fait l'histoire de tous ces tubes et décrit les phases qui s'y présentent. Voici le résumé qu'il donne avec M. Müller de toutes leurs expériences :

« 1° *La décharge dans un tube à vide ne diffère pas essentiellement de celle qui a lieu dans l'air ou les autres gaz à la pression atmosphérique ; elle n'est pas un courant dans l'acception ordinaire de ce terme ; elle est de la nature de la décharge disruptive, les molécules de gaz effectuant un transport de l'électrisation. Selon toute probabilité, les gaz reçoivent des impulsions en sens contraires, celle qui émane de l'électrode négative étant la plus continue des deux (1). Il se forme souvent à l'intérieur du tube des dépôts métalliques provenant du métal enlevé aux électrodes, et qui laissent une trace permanente des intervalles compris entre les stratifications.*

» 2° *A mesure que la pression diminue, le potentiel nécessaire pour faire passer le courant diminue jusqu'à un certain point, pour augmenter ensuite ; les stratifications deviennent plus épaisses et moins nombreuses, jusqu'à ce qu'on atteigne une pression pour laquelle aucune force électro-motrice n'est capable de produire une décharge à travers le résidu gazeux (2) ».*

(1) De la Rue et Müller, *Phil. Trans.*, 1878, vol. CLXIX, pp. 90 et 118.

(2) D'observations faites à des pressions variant de 6,4 à 145,1 millims., Wiedemann et Rühlmann ont conclu que l'accumulation nécessaire pour produire la décharge croît avec la pression, rapidement d'abord, lentement ensuite ; vers la limite supérieure de leurs expériences, elle devient presque proportionnelle à la pression. (Voir vol. II, p. 121, etc.)



Pl. XLV. — Stries de la Rue.

Ainsi, la pression maximum d'hydrogène à laquelle le courant peut traverser le tube 145, est de 19 millimètres (25 000 M) pour une pile de 8 040 éléments et de 35 millimètres (46 053 M), pour une pile de 11 000 éléments; la pression minimum pour laquelle le courant est aussi interrompu a été, pour le même tube, de 11 M et de 3 M pour des piles de 8 040 et de 11 000 éléments. A la pression de 0^{mm},005 (6,58 M), le courant de 11 000 éléments ne pouvait passer que si le fil rectiligne était négatif; à 1,8 M (0^{mm},00137) le courant ne passait plus dans aucune direction. Quand l'absorption continue du gaz eut réduit la pression à 0,066 M (0^{mm},000055), la décharge d'une bobine d'induction, capable de donner des étincelles de 1 pouce (2^{cm},54) dans l'air, ne pouvait plus franchir le tube, mais elle le franchit après qu'on y eut fait passer la décharge d'une bobine de 6 pouces (0^m,152). La pression avait alors remonté à 0^{mm},0024 ou 3,2 M.

Lorsqu'un des pôles d'une pile de 8 040 éléments est relié à l'une des électrodes du tube 143, auquel est attaché un radiomètre, l'autre électrode étant écartée de la première de 0,1 pouce (2^{mm},54) et reliée, à travers un galvanomètre Thomson sensible, à l'autre pôle de la pile et à la terre, le courant n'était pas supérieur à celui qui résulterait de la simple conduction par la surface et la masse du verre. Quoiqu'il ne passât pas de courant, les fils conducteurs, agissant par induction, arrêtaient le mouvement du radiomètre, ainsi que l'a observé Sir W. Grove.

« 3° *Toutes les stratifications ont leur origine au pôle positif.* Ainsi, avec un tube donné et un certain gaz, il y a une pression pour laquelle on obtient une simple lueur qui se forme au pôle positif; quand on diminue la pression peu à peu, cette lueur se détache, se meut vers le pôle

négatif et est suivie successivement de plusieurs autres, dont le nombre croît graduellement jusqu'à une certaine limite.

» 4° *Avec le même potentiel, les phénomènes varient d'une manière irrégulière avec l'intensité du courant.*

Dans certains tubes, le nombre des stratifications augmente et diminue avec l'intensité du courant; dans d'autres tubes, le nombre des stries augmente quand l'intensité diminue. Si le courant est fourni par un condensateur chargé, où le flux marche d'une armature à l'autre à travers des résistances et le tube, le nombre des stries se modifie à mesure que le potentiel du condensateur tombe et l'intensité diminue. Alors, si ce nombre diminue quand le potentiel baisse, la strie la plus proche du pôle positif y disparaît la première, puis la seconde la suit et disparaît à son tour, et ainsi des autres; si, au contraire, la charge du condensateur augmente graduellement, les stries se détachent l'une après l'autre du pôle positif avec une forme bien définie, et le phénomène est de la plus grande beauté.

» 5° *Un changement d'intensité du courant produit souvent une modification complète dans la couleur des stries.* Ainsi, dans un tube à hydrogène, elles passent du bleu de cobalt au rose. Les spectres des stries sont aussi modifiés; il y a plus, les électrodes lumineuses et les stries ont des spectres différents.

» 6° *Si la décharge est irrégulière et les stries confuses, un changement d'intensité du courant rendra les stries distinctes et fixes.* Le plus souvent on obtient une phase de stabilité en introduisant avec précaution des résistances extérieures; si on continue, l'introduction d'une résistance plus grande produit une nouvelle phase d'instabilité, et, en ajoutant encore des résistances, une phase de fixité et de netteté des stries.

» 7° *Le dégagement de chaleur est maximum dans le voisinage des stries.* On l'observe très bien quand le tube ne contient qu'une seule strie, ou un petit nombre de stries séparées par de larges intervalles. Il y a lieu de croire qu'il existe des stries même dans la décharge obscure, car on a constaté un développement de chaleur au milieu d'un tube dont les extrémités seules étaient illuminées.

» 8° *Même quand les stries paraissent parfaitement immobiles, on peut observer dans le courant une pulsation* (en intercalant un téléphone ou une bobine d'induction dans le circuit); *mais il n'est pas prouvé que les stries dépendent de cette intermittence.*

» 9° *Une pile ne donne pas de courant à travers un tube partagé en deux chambres par une cloison de verre; le tube ne peut être illuminé que par des charges alternatives.*

» 10° *Dans le même tube, avec le même gaz, on peut produire une grande variété de phénomènes en faisant varier la pression et l'intensité du courant. Les luminosités et les stries peuvent être reproduites sous leurs diverses formes dans le même tube ou dans d'autres tubes de dimensions semblables.*

» 11° *A la même pression, avec la même intensité de courant, le diamètre du tube influe sur le caractère et l'écartement des stries (1).* »

(1) Les auteurs signalent encore une forme curieuse de la décharge. Dans un tube à hydrogène, les deux fils recourbés suivant l'axe ont été complètement noyés dans le verre, de façon que la section seule du fil fût laissée à nu. Avec une pile de 5120 éléments, on vit un grand nombre d'étincelles qui s'échappaient du pôle négatif et s'écartaient à angle droit de l'axe du tube; formant une courbe qui figurait les rayons d'une roue. La direction axiale des impulsions négatives paraît jouer un rôle important dans la production des stries; plusieurs expériences anciennes de Gassiot et de Hiltorf conduisent aux mêmes conclusions.

APPENDICE

AUX CHAPITRES XXXIV ET XXXV.

EXPÉRIENCES SUR LA DÉCHARGE DISRUPTIVE FAITES AVEC
LA PILE A CHLORURE D'ARGENT, PAR MM. WARREN DE
LA RUE ET HUGO W. MÜLLER.

PREMIÈRE PARTIE (1)

La première partie de ces recherches a été communiquée à la Société Royale le 23 août 1877. Elle comprend la description de la pile à chlorure d'argent (vol. I, p. 443); la description des appareils (micromètres à décharges, commutateurs); l'étude des distances explosives aux pressions atmosphériques ordinaires et celle de la décharge. Ce mémoire est analysé dans le chapitre XXXIV. Les détails suivants présentent encore quelque intérêt.

Distances explosives aux pressions ordinaires.

Lorsque les extrémités polaires entre lesquelles se fait la décharge ont la forme de sphères ou de disques, la nature des métaux n'a pas d'influence sur la distance explosive. La longueur de l'étincelle dépend essentiellement du nombre des éléments de la pile et de leur force électro-motrice : elle ne paraît pas dépendre de la résistance intérieure de la pile.

Quand l'étincelle éclate entre une pointe et un disque, la forme de la pointe a une grande influence : la forme la plus avantageuse diffère peu d'un paraboloïde à sommet émoussé. La longueur de l'étincelle dépend aussi du signe de la pointe. Pour des tensions de 5000 à 8000 éléments, la décharge disruptive est plus longue lorsque la pointe est positive; mais pour des tensions de 1000 à 3000, elle est plus longue quand la pointe est négative.

(1) *Phil. Trans.*, part. I, vol. CLXIX, p. 55; — *Annales de Chimie et de Physique*, 5^e série, vol. XIII, p. 433 (1878).

La distance explosive entre deux pointes paraboliques ou entre une pointe et un disque est sensiblement proportionnelle au carré du nombre des éléments.

Entre deux surfaces sphériques, planes ou cylindriques, la distance explosive ne suit plus cette loi : elle se rapproche plutôt de la proportionnalité au nombre simple d'éléments.

Voici les résultats comparatifs pour les surfaces sphériques et les pointes :

		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Distance explosive entre deux	{ pointes	0,127	0,533	1,316	2,704	4,521	6,325	8,230	10,18
	{ surfaces sphériques }	0,127	0,324	0,584	0,851	1,146	1,448	1,760	2,08

Ces résultats confirment cette conclusion de Sir W. Thomson qu'une pile de 5510 éléments Daniell produit une étincelle dans l'air ordinaire, entre deux surfaces légèrement convexes, à la distance de 1^{mm},32.

Dans la plupart des cas, la nature du métal n'influe pas sur la longueur de l'étincelle; cependant, l'aluminium présente une exception remarquable, et donne une étincelle plus longue que celle des autres métaux dans le rapport de 1,242 à 1.

La décharge de la pile, avec 1 ou 2 pôles en forme de pointe, présente quelques phénomènes remarquables qui précèdent le passage véritable de l'étincelle, c'est-à-dire la formation de l'arc voltaïque, et qui n'ont pas lieu avec des sphères ou des disques. Ainsi, avec 8040 éléments, la distance explosive entre une pointe et un disque est de 8^{mm},64; mais il y a une décharge lumineuse, même à la distance de 13 à 15 centimètres, que l'on peut mettre en évidence en interposant un tube à vide entre la pile et un des pôles : ce tube s'illumine. Le courant qui passe alors est très faible, eu égard à celui qui a lieu après la formation de l'arc voltaïque; même quand la distance des pôles diffère peu de la distance explosive. En examinant cette décharge en effluve avec un microscope coudé muni d'un miroir tournant, entre l'objectif et l'oculaire, on reconnaît qu'elle est intermittente et qu'elle est moins continue quand la pointe est positive que lorsqu'elle est négative.

Effet des condensateurs.

Les auteurs ont étudié les effets de la décharge de condensateurs chargés avec leur pile. Un condensateur de 42,8 microfarads, chargé

par 3240 éléments, volatilise un fil de platine de 0^m,27 de longueur et 0^{mm},317 de diamètre. On a constaté qu'une très petite partie seule de la charge est dépensée par la volatilisation du fil.

Ils ont fait passer la même décharge sur un lapin à l'aide de deux conducteurs placés l'un dans l'oreille, l'autre dans la gorge : le seul effet a été de paralyser pendant une heure les pattes de devant. A travers le corps humain, la secousse est violente et le malaise dure plusieurs heures : la peau est percée de petits trous et cautérisée au point où passe l'étincelle. Toutefois, la décharge à travers un corps vivant est très incomplète, et, quand on réunit de nouveau les armatures, on obtient une détonation presque aussi grande que s'il n'y avait pas eu de perte électrique. Un des auteurs a reçu la décharge de 8040 éléments sans condensateur.

DEUXIÈME PARTIE

La deuxième partie a été communiquée à la Société Royale le 10 avril 1878 (1).

Décharges dans les tubes à gaz raréfiés.

Les appareils employés pour faire le vide et examiner la décharge dans les tubes ont été décrits page 160.

Mesure de la résistance des tubes.

La résistance des tubes ne dépend pas seulement de la distance des électrodes, mais beaucoup aussi de leur diamètre : ainsi les tubes pour l'analyse spectrale, qui ont une portion capillaire, présentent généralement au courant de la pile une résistance beaucoup plus grande que des tubes larges notablement plus longs. Cette influence des étranglements a été étudiée en comparant deux tubes ayant sensiblement la même longueur et le même diamètre intérieur, et présentant au milieu de leur longueur une partie capillaire dans l'un, un diaphragme en verre percé d'un trou dans l'autre. L'étranglement dans le premier tube étant 125 fois plus long que dans l'autre, le rapport de la différence des potentiels n'était cependant que de 4,31. Il est donc évident que l'effet principal est dû à la simple contraction du tube.

La résistance des tubes était mesurée d'abord à l'aide d'un pont

(1) *Phil. Trans.*, part. I, vol. CLXIX, p. 155, et *Annales de Chimie et de Physique*, 5^e série, vol. XV, p. 289.

de Wheatstone, dans lequel un tube à décharges (laissant passer facilement un courant de 440 éléments) était substitué au galvanomètre, la différence de potentiel entre les extrémités de la diagonale du pont éprouvant de telles variations dans le cours des expériences que l'aiguille était projetée violemment.

Deux des côtés du parallélogramme sont formés par des tubes à liquide plongés dans de la glace fondante, et dont la résistance est de 420 000 ohms; une boîte de résistances variables et le tube à essayer forment les deux autres côtés. Les pôles de la pile sont reliés respectivement à la jonction des tubes à liquide et à celle du tube à essayer et de la boîte étalonnée. Si celle-ci offre une résistance plus grande ou plus faible que celle du tube à essayer, le tube *témoin* situé dans la diagonale du pont s'illumine; mais, lorsque l'équilibre est établi, toute leur cesse dans ce tube. On n'a pas tardé à reconnaître que le tube témoin peut être supprimé; car dès que la résistance de la boîte dépasse un peu celle du tube que l'on essaye, celui-ci s'illumine par le passage du courant.

Les auteurs ont reconnu ensuite qu'il était préférable de déterminer les résistances des tubes, non par une mesure préliminaire, mais dans le cours même des observations sur la stratification, à l'aide d'un galvanomètre ou d'une mesure de potentiel.

En étudiant par cette méthode un tube dont la longueur était rendue variable à l'aide de sondes en forme d'anneaux, placées à divers points dans l'intérieur du tube, on a constaté qu'à pression constante la résistance du tube à gaz n'est pas en raison inverse de la distance des extrémités, comme pour les fils conducteurs (V. p. 158).

On remarqua, dans ces expériences, que la résistance pour une distance donnée paraissait plus grande au voisinage du pôle négatif que dans les autres parties du tube : le potentiel sur les différentes sondes fut alors déterminé au moyen d'un électromètre de Thomson muni d'une plaque d'induction qu'on pouvait placer à une distance quelconque du quadrant situé au-dessous. L'expérience fut faite, entre autres, sur un tube à acide carbonique muni de 17 sondes en anneaux distantes de 0^m,05. L'un des pôles de la pile communiquait avec le premier anneau, le dernier anneau et l'autre pôle de la pile étant reliés à la terre. La différence de potentiel maximum fut trouvée entre le dernier et l'avant-dernier anneau au pôle négatif; la plus grande ensuite, quoique notablement inférieure, était entre le dernier et l'avant-dernier du côté positif. Dans le reste du tube, la distribution du potentiel est sensiblement uniforme. La pile employée était de 2400 éléments, et on ajoutait dans le circuit des résistances convenables pour faire varier l'intensité du courant.

La résistance de la pile étant très faible par rapport à celle du tube, le potentiel mesuré au pôle de la pile relié au premier anneau variait très peu, soit que le dernier anneau fût isolé, soit qu'il fût mis à la terre. L'intensité du courant étant réduite à moitié par l'introduction de résistances, la différence de potentiel des extrémités du tube restait cependant constante, résultat auquel on ne pourrait parvenir avec un fil métallique qu'en doublant sa résistance. La différence de potentiel entre les deux extrémités du tube est restée constante avec des courants dont l'intensité variait de 1 à 135.

Les auteurs concluent donc que la décharge à travers les gaz raréfiés ne peut être comparée à la conduction par les métaux, car un fil entre les extrémités duquel existe une différence de potentiel déterminée ne peut laisser passer qu'un courant d'une seule intensité; mais elle ne diffère pas essentiellement de celles qui ont lieu dans l'air ou dans les autres gaz à la pression ordinaire : c'est réellement une *décharge disruptive*.

Dans ces expériences, il est absolument nécessaire de faire disparaître l'électricité qui s'écoule par déperdition sur la surface *extérieure* du tube et qui pourrait troubler les mesures du potentiel du gaz *intérieur* : on y parvient en mettant de petits anneaux d'étain sur le tube près des points où les fils de métal sont soudés dans le verre, et en reliant ces anneaux avec le sol.

Dans un mémoire publié en 1870 (*Proc. Roy. Soc.*, vol. XIX, p. 237), M. Varley dit : « Nous avons trouvé que le passage du courant est réglé par les lois suivantes : 1° chaque tube exige un certain potentiel pour être amorcé; 2° une fois le courant établi, un potentiel plus faible suffit pour l'entretenir; 3° si P est le potentiel minimum nécessaire pour maintenir le courant dans un tube et qu'on donne au potentiel les valeurs $P + 1$, $P + 2$, ..., $P + n$, l'intensité varie comme les nombres 1, 2, 3, ... n. Il semble qu'un certain effort est nécessaire pour traverser le gaz raréfié; après quoi, ce gaz se comporte comme un conducteur ordinaire, pourvu que l'on retranche de la pile réelle le nombre d'éléments capable de produire ce potentiel P, qui est dépensé à vaincre l'obstacle opposé par le tube. »

La première et la deuxième loi sont confirmées par les expériences quotidiennes des auteurs; et les faits qui ont conduit M. Varley à énoncer la troisième loi donnent une nouvelle preuve de la différence constante qui existe entre les potentiels des extrémités du tube. M. Varley employait une pile de résistance intérieure r , reliée par une résistance R à une extrémité du tube dont l'autre extrémité communiquait avec l'autre pôle de la pile. Si $P + n$ est la différence de

potentiel produite par la pile, P la différence constante des deux extrémités du tube, l'intensité du courant C varie comme $\frac{P+n-P}{R+r}$, et si la résistance R est maintenue constante et assez grande pour rendre négligeables les variations de r dues à l'addition des éléments, C doit être proportionnel à n .

Ainsi, ce qu'on appelle la *résistance du tube* ne doit pas être considéré comme l'analogie d'une résistance métallique : c'est uniquement la résistance d'un fil qui, dans chaque cas particulier, pourrait maintenir la même différence de potentiel que le tube.

TROISIÈME PARTIE (1)

La troisième partie a été communiquée à la Société Royale le 20 novembre 1879.

Différence de potentiel dans un tube à décharges.

On a constaté, dans la deuxième partie, que la différence de potentiel nécessaire pour provoquer la décharge dans les tubes à gaz raréfiés diminue d'abord avec la pression, pour augmenter ensuite quand la pression continue de décroître, jusqu'à ce que le courant produit par une pile de 11 000 éléments soit totalement interrompu. Les auteurs se proposent maintenant de déterminer le *potentiel du tube*, c'est-à-dire la différence de potentiel nécessaire pour y provoquer la décharge à différentes pressions en se servant d'un nombre constant d'éléments (11 000) dans toutes les expériences.

Le tube employé avait 0^m,84 de longueur et 0^m,05 de diamètre, et renfermait de l'*hydrogène*. Une des électrodes avait la forme d'un anneau, l'autre d'un fil droit disposé suivant l'axe avec une distance entre elles de 0^m,775.

Au commencement de chaque série d'expériences, on prenait la déviation d'une boussole des tangentes lorsque la pile était fermée en court circuit. Une table calculée d'avance permettait de déduire de la déviation la résistance ρ en ohms de la pile. Puis on fermait la pile par le tube et on notait encore la déviation de la boussole, qui avait une valeur moindre, dont on déduisait la résistance totale R du circuit, c'est-à-dire la somme des résistances ρ de la pile et r du tube, $R = r + \rho$. La différence $R - \rho$ des deux nombres donnait la résistance r du tube.

(1) *Phil. Trans.*, part. I, vol. CLXXI, p. 65 ; — *Annales de Chimie et de Physique*, 5^e série, vol. XX, p. 145.

Ce raisonnement suppose que la résistance du tube est assimilable à celle d'un fil métallique : la résistance réelle du tube doit être plus forte s'il existe, au moment de la décharge, une force électro-motrice opposée à celle de la pile ou une polarisation des électrodes.

La pile étant de 11 000 éléments, le potentiel V du tube exprimé en nombre d'éléments au chlorure d'argent est alors

$$V = 11\,000 \times \frac{r}{R},$$

Quand l'électrode annulaire est positive, la décharge commence à passer à la pression de $35^{\text{mm}},5$ ou $46\,710 \text{ m}$ (millionièmes d'atmosphère), et la différence de potentiel est alors de 10 250 éléments. Cette différence diminue d'abord avec la pression; elle n'est plus que de 430 éléments pour la pression de $0^{\text{mm}},642$ ou 845 m ; puis elle se relève très rapidement et atteint 8937 éléments à la pression de $0^{\text{mm}},0065$ ou $8,6 \text{ m}$. A la pression de $0^{\text{mm}},002$ ou 3 m , la pile entière est juste suffisante et la décharge ne passe plus pour une pression de $0^{\text{mm}},00137$. Si la pression est réduite à $0^{\text{mm}},000\,055$ ($0,07 \text{ m}$), la décharge d'une bobine d'induction capable de donner dans l'air des étincelles de 25 millimètres est également interceptée.

En faisant de l'anneau l'électrode négative, les potentiels du tube ont été plus faibles en général, et un minimum de 388 éléments a eu lieu pour la pression de $0^{\text{mm}},822$; mais la marche des phénomènes était tout à fait la même.

Les résultats ont été traduits en courbes en prenant pour ordonnées les nombres d'éléments représentant le potentiel du tube et pour abscisses soit les pressions évaluées en millionièmes d'atmosphère, soit des longueurs proportionnelles à la distance moyenne des molécules, c'est-à-dire en raison inverse de la racine cubique de la pression.

Les phénomènes de stratification observés avec ce tube (n° 162) sont semblables à ceux observés avec des tubes analogues : ils ont cependant offert une phase curieuse quand la pression était de $0^{\text{mm}},747 = 983 \text{ m}$, la différence de potentiel du tube de 4800 éléments et l'électrode rectiligne positive. Plusieurs des strates, en forme de coupe, étaient suivies d'une série secondaire de langues lumineuses qui apparaissaient et disparaissaient alternativement au même point, de sorte que la photographie (en sept secondes) restait parfaitement nette.

En introduisant une résistance de 230 000 ohms, on vit se dessiner plus nettement le phénomène un peu confus qui existait au voisinage

du pôle positif : les strates doubles immobiles, avaient la forme d'un X.

Ces expériences n'ont pas été répétées sur d'autres tubes, parce que le circuit de la pile doit être fermé très longtemps pour obtenir dans la boussole des déviations constantes. La pile, dans ces conditions, s'usait trop rapidement. Pour la ménager, on a employé deux autres méthodes qui seront décrites à la fin.

Potential nécessaire pour produire une décharge entre deux disques à distance constante et sous des pressions variables.

Les auteurs ont cherché d'abord s'il se produit une condensation ou une dilatation des gaz au voisinage des électrodes *avant la dé-*

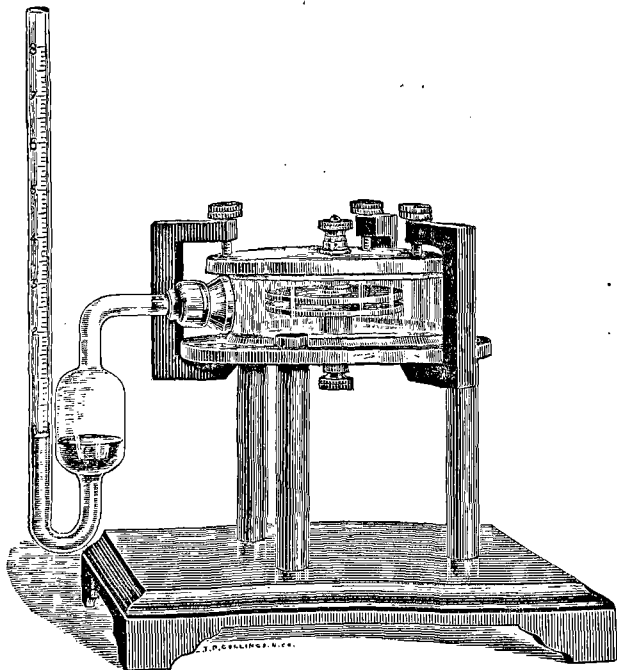


FIG. 218.

charge. L'appareil se compose d'un cylindre de verre (fig. 218), dont toutes les parties ont bien la même hauteur, afin d'être bien sûr du

parallélisme des deux plateaux de verre qui le ferment à ses deux extrémités. Des vis de serrage en ébonite maintiennent ces plateaux contre les bords du cylindre, et l'appareil entier repose sur un support d'ébonite à trois pieds, encastré lui-même dans une table carrée en bois. Parallèlement aux deux bases du cylindre sont placés deux disques de laiton à contours arrondis de 10 centimètres de diamètre : ces disques sont écartés de $3^{\text{mm}},3$, distance maximum à laquelle pouvait passer la décharge des 11 000 éléments sous la pression atmosphérique. Chaque disque est porté par une tige à vis qui traverse la base correspondante du cylindre et qui se termine par une vis d'attache où aboutit une des électrodes de la pile. Une tubulure latérale met le cylindre en communication avec un manomètre contenant de l'acide sulfurique concentré, qui dessèche l'intérieur du cylindre et indique si le gaz que ce dernier renferme se condense ou se dilate quand, à l'aide d'une clef de contact, on relie les disques métalliques à la pile.

Avec une pile de 9800 éléments, on ne constate pas le moindre changement dans la pression du gaz : il n'y avait donc ni condensation sur les disques, ce qui aurait produit une contraction du volume du gaz, ni répulsion venant des disques, ce qui aurait produit une dilatation du volume. On observait la hauteur du liquide avec une lentille, mais on ne put rien découvrir. Il en fut de même en substituant de l'eau à l'acide sulfurique. Le résultat de l'expérience est donc négatif.

Dans les expériences de décharges, les disques avaient 38 millimètres de diamètre et étaient montés sur le micromètre à étincelles de la figure 121. On les réglait à la distance explosive maximum ($3^{\text{mm}},3$) qui correspond à la pression atmosphérique pour la pile de 11 000 éléments, et on vérifiait qu'à cette distance les 11 000 éléments provoquaient bien la décharge. On opérait ensuite avec un nombre d'éléments moindre, et l'on diminuait la pression jusqu'à réapparition de la décharge.

Les expériences ont porté sur l'air, l'hydrogène et l'acide carbonique.

Dans l'air, la décharge se produisait à la pression atmosphérique avec 11 000 éléments, les disques étant écartés de $3^{\text{mm}},3$, et, avec 600 éléments à une pression moyenne de 10 millimètres.

Dans l'hydrogène, la décharge se produisait à la pression atmosphérique avec 11 000 éléments, les disques étant distants de $5^{\text{mm}},59$, et avec 600 éléments à la pression de 14 millimètres.

Dans l'acide carbonique, la décharge se produisait à la pression atmosphérique avec 11 000 éléments, les disques étant écartés de $3^{\text{mm}},096$, et, avec 600 éléments, à la pression de $5^{\text{mm}},2$.

Si on traduit les résultats par une courbe, avec les pressions comme abscisses et les nombres d'éléments comme ordonnées, les expériences sont représentées très exactement dans chaque cas par une branche d'hyperbole. En prenant sur la ligne des abscisses 1 millimètre pour 2500 mm, et sur celles des ordonnées 1 millimètre pour 25 éléments, ces hyperboles sont presque équilatères. Le rapport de l'axe réel (pressions) à l'axe imaginaire (potentiels) est, en effet :

Pour l'air.	0,9665
— l'hydrogène.	1,0170
— l'acide carbonique.	1,0690

Les expériences antérieures décrites dans la première partie ont conduit les auteurs à la même relation entre les potentiels et les distances quand, à pression constante, on fait passer la décharge entre deux surfaces sphériques ou entre deux disques. La même longueur représente 0mm,254 pour les abscisses (distance explosive) et 1000 éléments pour les ordonnées. Dans le cas des surfaces sphériques, les points déterminés par la moyenne d'un grand nombre d'expériences s'écartent très peu de l'hyperbole correspondante. L'accord est moins satisfaisant pour les disques où le nombre des expériences a été beaucoup moindre. Néanmoins, on peut regarder la loi de l'hyperbole comme s'appliquant également au cas d'une pression constante et d'une distance variable, et à celui d'une distance constante et d'une pression variable : l'obstacle à la décharge étant, jusqu'à un certain point, proportionnel au nombre des molécules interposées entre les électrodes (1).

Le tableau suivant résume les résultats obtenus avec des disques de 38 millimètres de diamètre :

(1) Le docteur A. Macfarlane a publié dans les *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1878, vol. XXVII, des recherches très soignées sur la décharge disruptive de l'électricité dans l'air et différents gaz et entre des électrodes de formes diverses. Il employait une machine de Holtz et des potentiels bien plus élevés que ceux de MM. de la Rue et Müller. Il trouve que les résultats de la décharge entre deux disques de 10 centimètres de diamètre à des distances variables jusqu'à 1,2 centimètre et à des pressions variables sont représentés d'une façon satisfaisante par l'hyperbole.

*Distance explosive à pression constante dans l'air
(entre des disques).*

F. E. M. en volts.	Distance explosive en centimètres.	Différence de potentiel par centimètre en volts.	Intensité de la force	
			Electro- magnétique.	Electro- statique.
1 000	0,0205	48 770	4,88 × 10 ¹²	163
2 000	0,0430	46 500	4,65 —	155
3 000	0,0660	45 450	4,55 —	152
4 000	0,0914	43 770	4,38 —	146
5 000	0,1176	42 510	4,25 —	142
6 000	0,1473	40 740	4,07 —	136
7 000	0,1800	38 890	3,89 —	130
8 000	0,2146	37 280	3,73 —	124
9 000	0,2495	36 070	3,61 —	120
10 000	0,2863	34 920	3,49 —	116
11 000	0,3245	33 900	3,39 —	113
12 000	0,3378	33 460	3,35 —	112

ÉTUDE DE L'ARC DE DÉCHARGE

Le reste du mémoire a trait à l'étude du phénomène de l'arc électrique en faisant varier les conditions de distance, pression et potentiel. Les expériences confirment cette manière de voir que l'arc et la décharge stratifiée sont de simples modifications du même phénomène.

On a étudié en particulier l'arc produit entre deux conducteurs placés dans une cloche de verre où l'on introduisait un gaz à une pression quelconque. Entre certaines limites de pression, on a constaté un fait remarquable : au moment où la décharge se produit, il se manifeste une expansion subite du gaz qui persiste tout le temps de la décharge et disparaît instantanément avec elle. Cette expansion subite ne peut pas s'expliquer par le seul fait d'un dégagement de chaleur, et il faut en chercher ailleurs que dans l'échauffement du gaz la cause, qui serait, par exemple, une véritable projection des molécules due à la décharge elle-même et produisant une pression distincte de la pression statique du gaz.

En séparant la cloche en deux compartiments à peu près égaux, au moyen d'une cloison horizontale percée d'un trou plus ou moins grand pour livrer passage à la décharge, on a constaté que l'expansion

sion du gaz se produisait simultanément et également aux deux pôles.

Le professeur Dewar a constaté récemment (5 juillet 1879) un phénomène analogue dans l'arc électrique produit par une machine Siemens à lumière. L'arc étant renfermé dans une cloche renversée sur le mercure, il se produisait de temps en temps des soubresauts avec une grande expansion du gaz, sans qu'il parût y avoir des variations de température correspondantes.

M. de la Rive a constaté aussi que le mercure d'un manomètre relié à un tube à gaz raréfié éprouvait des oscillations dès que le courant passait. Voici, d'ailleurs, comment il s'exprime à ce sujet :

« Le phénomène, dans les fluides élastiques raréfiés, consisterait dans des contractions et dilatations alternatives du milieu gazeux produites par la série des décharges plus ou moins discontinues dont le jet électrique est formé. En effet, que ce soit par l'appareil Ruhmkorff ou bien par une machine électrique ordinaire, ou une machine hydro-électrique d'Armstrong et même par une pile voltaïque à haute tension, qu'on produise les stratifications, on n'a jamais une décharge continue, mais bien une série de décharges qui peuvent se succéder assez rapidement pour que la discontinuité ne soit pas accusée, même par un galvanomètre; mais cette discontinuité n'existe pas moins, comme M. Gassiot l'a montré en opérant avec une pile de Grove à haute tension qui, avec les mêmes électrodes et dans le même milieu, peut donner naissance d'abord à des stratifications, puis plus tard à un arc voltaïque quand le courant est devenu continu.

» Au reste, l'action mécanique de la série des décharges sur le fluide élastique raréfié peut être constatée directement par les oscillations très prononcées de la colonne de mercure du manomètre mis en communication avec le fluide élastique, qui accompagnent la propagation de l'électricité dans ce fluide. »

Les expériences de M. de la Rive montrent que l'intensité des oscillations dépend de la résistance plus ou moins grande que le milieu gazeux oppose à la transmission du jet électrique; car elles sont plus considérables avec l'azote et l'air qu'avec l'hydrogène; elles atteignent leur maximum à la pression où la décharge peut s'opérer d'une manière complète, et, à partir de cette valeur de la pression, elles diminuent en même temps que la pression. Ces oscillations ont été obtenues dans des tubes de 0^m,16 de long et de 0^m,05 de diamètre. On n'a pu les observer dans des tubes de 0^m,50 et de 1 mètre, quel que fût le gaz et quelle que fût la pression. Par contre, elles ont été observées dans un bocal de 0^m,20 de hauteur sur 0^m,16 de diamètre rempli d'hydrogène raréfié, dans lequel le jet électrique passait d'une

boule centrale à un anneau concentrique à cette boule de 0^m,12 de diamètre.

« Ce dernier résultat montre que l'absence d'oscillations dans les longs tubes tient moins au volume de la couche gazeuse, qui est plus faible qu'elle ne l'est dans le bocal, qu'à l'influence des parois du tube, qui gênent le mouvement du gaz. C'est aussi une preuve que les oscillations proviennent bien d'une action mécanique et non d'une élévation de température.

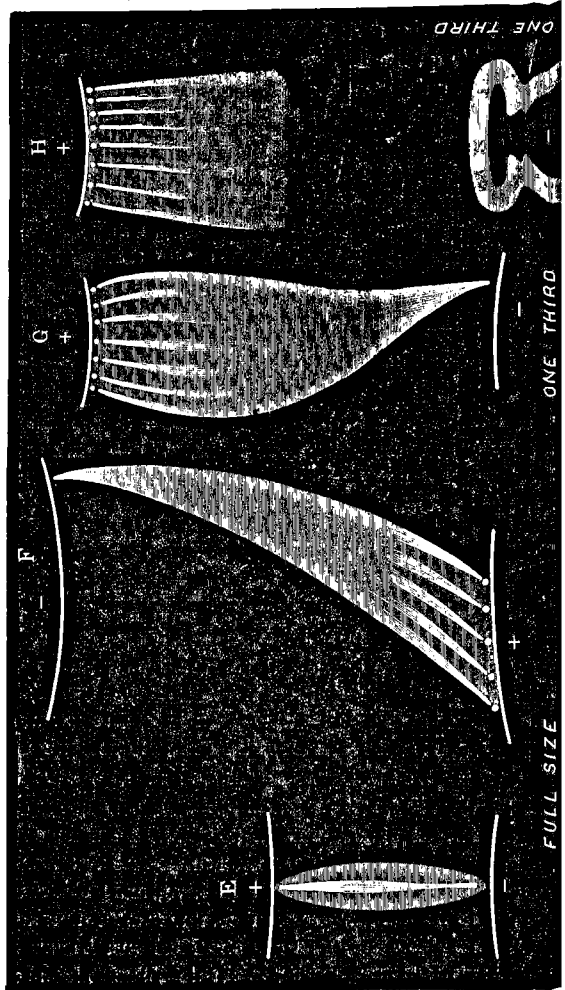
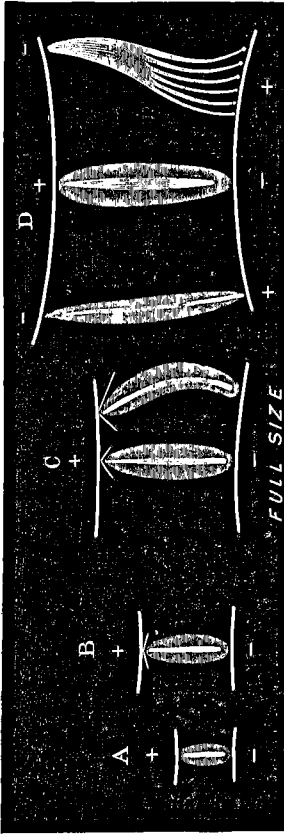
» La stratification de la lumière électrique serait donc un phénomène analogue à la production des ondes sonores, c'est-à-dire un phénomène mécanique provenant d'une succession d'impulsions isochrones exercées sur la colonne gazeuse raréfiée par la série des décharges électriques se succédant très rapidement les unes aux autres. Nous trouvons une nouvelle preuve en faveur de cette manière d'envisager le phénomène dans la perturbation qu'apporte aux stratifications un déplacement de la matière gazeuse qui permet leur apparition. Il suffit, pour produire cette perturbation, d'introduire dans le tube où l'on a un gaz raréfié, pendant que l'électricité s'y propage, une quantité additionnelle du même gaz, de manière à augmenter la pression de 1/4 ou 1/2 millimètre au plus. » (Genève, *Mém. Soc. Phys.*, XVII, 1863, pp. 73-74.)

*Apparences de l'arc quand on fait varier les conditions
de la décharge.*

Les auteurs décrivent ensuite les apparences de l'arc entre des électrodes de formes diverses, à des distances différentes, sous des pressions variables, dans l'air, l'hydrogène et l'acide carbonique. Ils ont constaté que la lumière émise par les différentes parties de l'arc n'a pas partout la même intensité et que l'arc a une tendance manifeste à se diviser en « entités distinctes » jusqu'à ce que la stratification soit nettement dessinée.

Par exemple, dans l'hydrogène et l'acide carbonique, entre des disques, on a, à la pression atmosphérique, un fuseau central qui se détache de l'électrode positive, mais n'atteint pas tout à fait le pôle négatif; la pression commençant à diminuer, il se forme une masse distincte, puis des stratifications. La pression diminuant toujours, l'espace obscur voisin de l'électrode négative augmente de plus en plus, en même temps que la lueur de cette électrode s'élargit jusqu'à couvrir toute la surface du disque.

La planche XLVI représente quelques-uns des phénomènes observés dans l'*hydrogène* entre deux surfaces sphériques de 76^{mm},2



de rayon, et dont le cercle de base avait un diamètre de 38 millimètres, avec une pile de 10 960 éléments, à la température de 13°,3 C. dans des conditions qui sont résumées dans le tableau suivant :

	Distance des électrodes.	Pression.	Intensité du courant.
Pl. XLVI, A.	5 ^{mm} ,715 × 1	762 ^m ,8	0 ^w ,02456
— B.	— × 2	339	0 02371
— C.	— × 3	256	0 02456
— D.	— × 4	255	0 02544
— E.	— × 5	200,8	0 02634
— F.	— × 10	164,1	0 02056
— G.	— × 25	61,8	0 01272
— II.	— × 25	2,3	0 08923 (avec 2400 éléments).

Dans l'expérience C, l'arc se produisait d'abord au milieu des deux surfaces et se déplaçait ensuite vers la périphérie, comme on le voit à droite de la figure.

Dans l'expérience D, l'arc se produisait aussi au milieu d'abord et se fixait ensuite sur les bords, comme à droite de la figure, où il est représenté de face, et à gauche, où il est vu de profil.

Même phénomène pour l'expérience E.

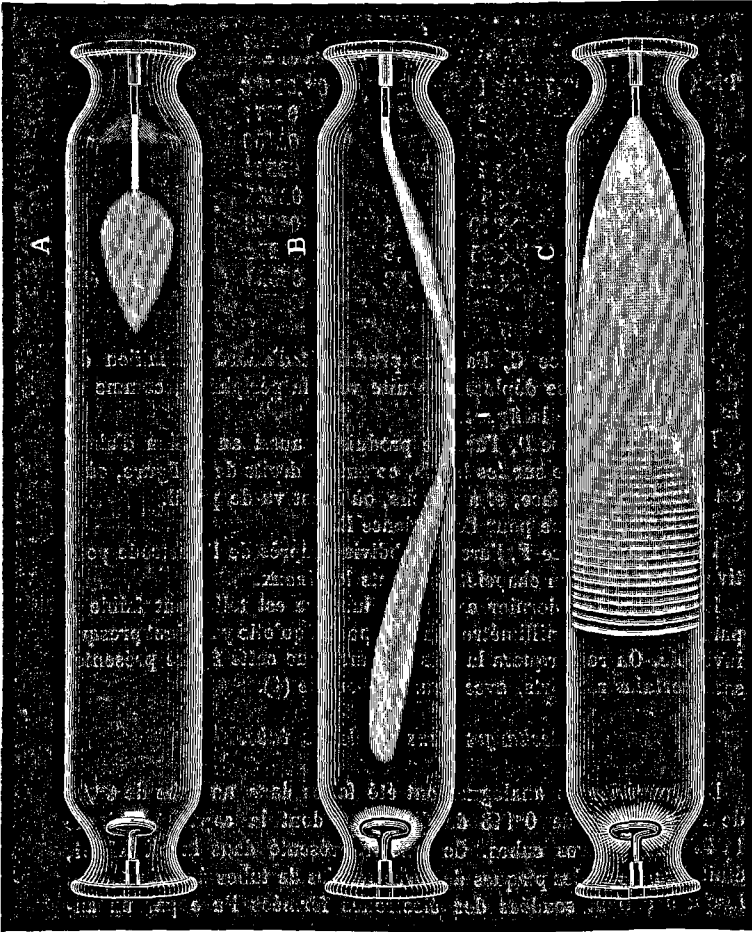
Dans l'expérience F, l'arc se subdivise auprès de l'électrode positive, où il forme un chapelet de points lumineux.

Enfin, dans le dernier cas, II, la lumière est tellement faible à partir de 25 ou 50 millimètres du pôle positif qu'elle y devient presque invisible. On remarquera la ressemblance que cette figure présente, sous certains rapports, avec l'aurore boréale (1).

Décharges dans un large tube.

Des expériences analogues ont été faites dans un tube de 0^m,94 de longueur et de 0^m,148 de diamètre, dont la capacité était de 14 435 centimètres cubes. Ce tube, représenté dans la pl. XLVII, était fermé par des plaques de verre munies de tubes à robinet dans lesquels étaient soudées des électrodes formées l'une par un anneau, l'autre par un fil droit et éloignées de 0^m,851.

(1) Le 22 avril 1880, MM. Warren de la Rue et Müller ont présenté à la Société Royale un mémoire sur la hauteur de l'aurore boréale, dont les conclusions sont fondées sur les expériences qui précèdent. Voir *Proceedings of the Royal Society*, vol. XXX, n° 203, p. 332, 1880.



Pl. XLVII. — Décharges dans un large tube.

Dans l'air, à la pression de 3 millimètres, avec 6300 éléments, les luminosités étaient bordées d'une bande plus sombre, et, tandis que la décharge était rouge (azote), le tube avait une belle phosphorescence bleue.

Voici le résumé de quelques expériences avec l'hydrogène :

Pression = 40 millimètres; nombre d'éléments = 11 000; courant = $0^w,00087$. L'arc présenta d'abord une lueur à l'anneau négatif et une luminosité en forme de flamme reliée au pôle positif par un trait brillant (A). Bientôt après, cette lueur s'étendit jusqu'auprès du pôle négatif (B) en léchant les parois du tube.

Pression = $1^{mm},5$; nombre d'éléments = 6300; courant = $0^w,05801$. On obtient une stratification remplissant presque complètement le tube (C).

Pression = $0^{mm},5$; nombre d'éléments = 4800; courant = $0^w,03657$. Le tube est rempli d'une lueur violette autour du pôle négatif, comme si la décharge éprouvait une difficulté particulière à partir de cette électrode et que le gaz fût projeté contre les parois du tube.

Gassiot avait déjà signalé des phénomènes semblables, et les expériences de M. Crookes (chap. xxxvii) ont montré que la matière ainsi projetée peut être concentrée en un foyer par des surfaces courbes.

L'extension de la lumière qui se produit à l'électrode négative est d'autant plus grande que la pression est plus faible et le courant plus intense. En terminant cette électrode par un fil de platine enroulé en hélice, on voit en effet qu'à des pressions élevées l'extrémité seule du fil s'illumine; mais à mesure qu'on augmente l'intensité du courant, l'illumination se propage peu à peu le long du fil, et finit par le couvrir dans toute son étendue.

Les expériences qui précèdent conduisent aux conclusions suivantes :

1° *Pour chaque gaz, il existe une pression limite qui correspond à un minimum de résistance au passage de la décharge. Si l'on diminue la pression au delà de cette valeur limite, la résistance croît avec une rapidité extrême (1).*

2° *Il ne semble pas y avoir de condensation ni de dilatation du milieu gazeux dans le voisinage des électrodes chargées.*

3° *La décharge est accompagnée d'une expansion subite du gaz, qui ne paraît due à l'échauffement que pour une très petite part. L'expansion cesse instantanément avec la décharge.*

4° *La relation qui existe entre la pression et la différence de*

(1) Avec l'hydrogène le minimum est de $0^{mm},64$; à $0^{mm},002$, la résistance est aussi grande qu'à 35 millimètres.

potentiel nécessaire pour produire la décharge entre deux surfaces planes, à distance constante, peut être représentée par une courbe hyperbolique; il en est de même pour la différence de potentiel et la distance explosive, lorsque la pression est constante. La résistance à la décharge entre deux plateaux varie comme le nombre des molécules interposées.

5° La loi n'est plus la même avec des pointes. Nous avons démontré dans la première partie que, sous pression constante, égale à la pression atmosphérique, le potentiel varie comme la racine carrée des distances explosives.

Avec une pile constante de 11 000 éléments, il a fallu diminuer la pression dans une proportion plus grande que celle de l'accroissement de la distance pour provoquer la décharge.

6° L'arc électrique et la décharge stratifiée dans le vide paraissent être des modifications du même phénomène.

MESURE DE LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL DES ÉLECTRODES D'UN TUBE A DÉCHARGES

Les deux méthodes suivantes permettent de mesurer cette différence sans que la pile s'use trop rapidement.

1° Avec le galvanomètre.

On se sert d'un galvanomètre Thomson avec une résistance extérieure très grande par rapport à celle de la pile, de façon à ce que celle-ci soit négligeable. On réunit ce galvanomètre G à travers la résistance extérieure aux deux pôles de la pile, d'abord ouverte, puis mise en communication par une clef K avec les électrodes TT' d'un tube contenant un gaz raréfié, ce qui donne deux déviations D et d. Si la pile a N éléments, la différence de potentiel V des électrodes exprimée en éléments est

$$V = N \frac{d}{D}$$

On peut employer avantageusement comme résistance une ligne tracée par un trait de crayon dur dans une rainure en forme de V, creusée le long d'une règle d'ébonite à section carrée LL', dont la section est représentée en SS. Cette ligne est divisée en plusieurs parties par de petites cavités où sont encastrés des cylindres de laiton A, B, C, D, bien nivelés avec la règle. Ces cylindres sont percés, suivant leur axe, d'un trou pour recevoir les vis d'attache.

Pour une règle ainsi préparée, les intervalles des vis d'attache étaient d'environ 0^m,23, et l'on a trouvé les résistances suivantes :

De A à D.....	149 670 megohms
— A à C.....	50 789
— A à B.....	8098

Si le potentiel à évaluer diffère peu de celui de la pile, on peut prendre les déviations d et D sans changer la résistance extérieure ; mais si ce potentiel est beaucoup plus faible, il faut employer une résistance moins grande pour la mesure de d . On supprime ensuite le tube à décharge et on reproduit approximativement cette déviation en diminuant le nombre d'éléments de la pile ouverte. On déduit le potentiel du tube de ces nouvelles données.

La résistance des traits de crayon change avec le temps ; mais cela importe peu, puisque dans chaque expérience le potentiel du

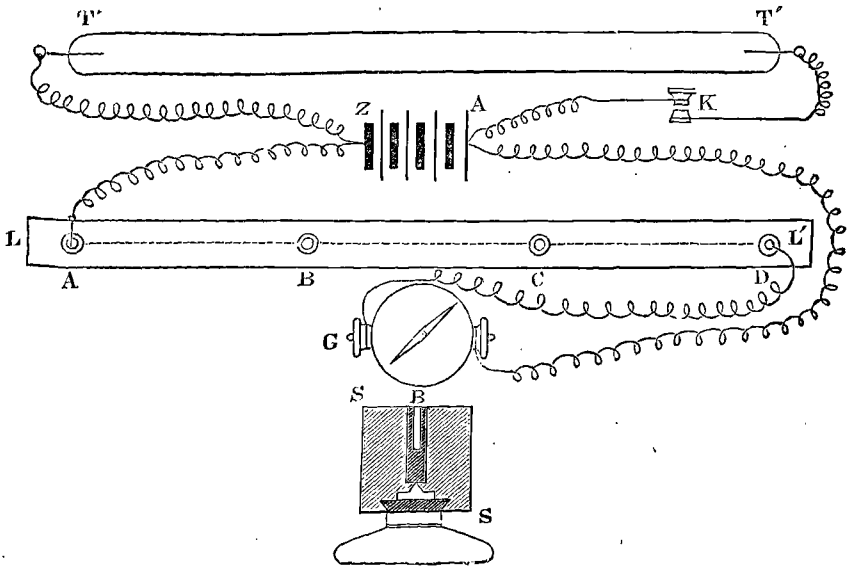


FIG. 249.

tube est équilibré par celui de la pile en se servant de la même résistance.

2^o Avec l'électromètre.

Les potentiels à mesurer étant généralement très élevés, il faut se servir de la plaque d'induction; mais, comme on a trouvé que cette plaque exerçait aussi son influence sur la paire de quadrants opposée

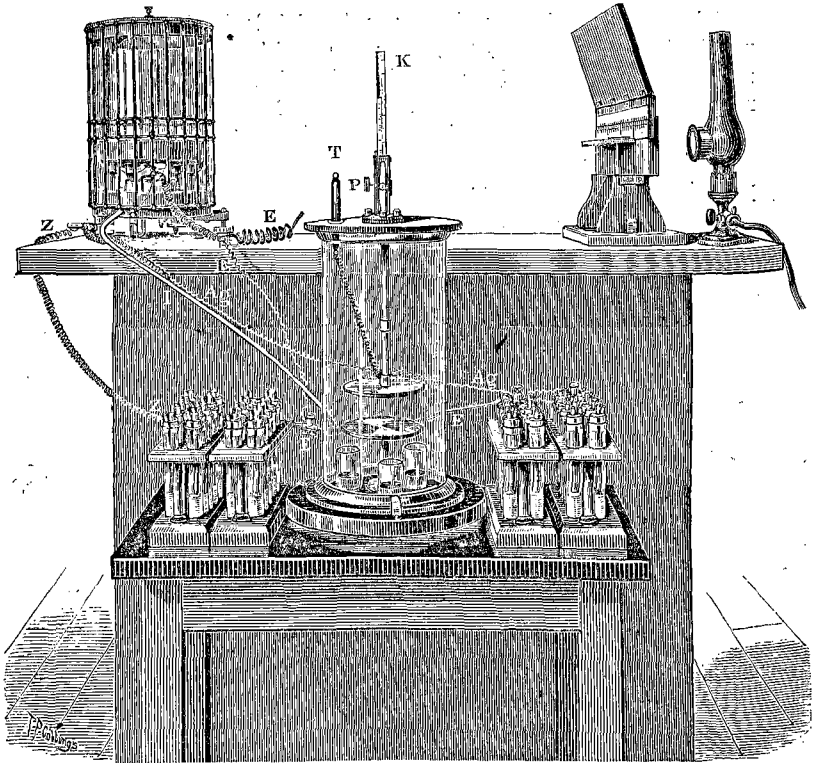


FIG. 220.

à celle au-dessus de laquelle elle est placée, on a détaché l'appareil d'induction de l'électromètre. De plus, sur le conseil de M. Mascart, l'électromètre a été rendu symétrique en électrisant avec la charge induite non plus un des quadrants, mais l'aiguille, et en reliant l'une des paires de quadrants au pôle Z, l'autre au pôle Ag d'une pile à chlorure d'argent divisée en 2 groupes de 20 éléments dont le

milieu est à la terre. De cette façon, les paires de quadrants sont chargées à des potentiels égaux et contraires, et l'aiguille éprouve les mêmes déviations d'un côté et de l'autre quand elle est portée successivement à des potentiels égaux et contraires.

L'aiguille est mise en communication par le conducteur I avec le plateau inférieur de l'appareil d'induction : le plateau supérieur, placé à une certaine distance au-dessus, est relié par le bouton T au corps dont on veut mesurer le potentiel.

Pour évaluer la différence de potentiel V entre les électrodes d'un tube à décharges, on met l'un des pôles de la grande pile ouverte en communication avec le sol, l'autre avec le bouton T, et on lit la déviation D de l'électromètre. On met ensuite l'appareil à décharges en dérivation entre les pôles de la pile, et on observe la nouvelle déviation d . Si les déviations de l'électromètre sont proportionnelles aux différences de potentiel, on a encore

$$V = N \frac{d}{D}.$$

S'il n'y avait pas proportionnalité, on construirait une table de graduation, et d et D seraient les nombres de la table correspondant aux déviations observées.

La grandeur des déviations peut être modifiée à volonté et dans un rapport connu, pour une même expérience, soit en élevant ou abaissant le plateau inducteur, soit en changeant le nombre des éléments de la pile qui électrise les quadrants.

CHAPITRE XXXVI

DE L'ÉTAT SENSITIF DES DÉCHARGES A TRAVERS LES GAZ RARÉFIÉS

Le 2 avril 1879, M. William Spottiswoode et M. J.-F. Moulton communiquaient à la Société Royale un mémoire « sur l'état sensitif des décharges électriques à travers les gaz raréfiés (1) ».

DÉFINITION ET DESCRIPTION

On a souvent remarqué que la colonne lumineuse produite dans les tubes à vide par la décharge électrique manifeste quelquefois une grande sensibilité quand on approche du tube le doigt ou un autre corps conducteur. L'effet exact de ce rapprochement varie beaucoup avec les circonstances de la décharge. Dans bien des cas, la colonne lumineuse est repoussée; dans d'autres, et surtout quand on touche le tube avec le doigt, la colonne est coupée; dans ce dernier cas, outre l'éclat lumineux qui existait auparavant, on voit souvent saillir de l'intérieur du tube, au point où repose le doigt, la lueur bleue qui caractérise généralement le bout négatif d'une décharge. Dans quelques cas, l'action de la décharge est si énergique que l'on voit apparaître sur le côté du tube opposé au point touché la fluorescence bleue ou verte bien connue (2).

(1) *Phil. Trans.*, 1879, p. 165.

(2) L'état sensitif est donc l'état dans lequel la décharge est affectée par la présence ou l'approche d'un conducteur.

Le degré de sensibilité varie entre des limites écartées. On rencontre souvent des décharges où il faut une observation attentive pour découvrir une trace de sensibilité; dans d'autres, la sensibilité est telle que l'on peut comparer l'action d'un conducteur à l'action magnétique d'un électro-aimant puissant. Cet état sensitif ne semble pas appartenir en propre à un milieu gazeux particulier, ou à une forme de tube spéciale; et il est très probable, en réalité, qu'avec des précautions convenables, on peut produire des décharges sensitives dans presque tous les tubes. Cet état peut se manifester dans des décharges stratifiées, mais plus généralement il accompagne les décharges où l'on ne voit pas de traces bien nettes de stratification. Toutefois, il ne se présente pas constamment dans ce genre de décharge (1).

Ce mémoire est consacré à un examen des causes qui produisent cet état et des lois qui le régissent.

(1) Les expériences de M. de la Rue et d'autres ont démontré que les décharges dans le vide ne sont jamais continues (ce dernier mot ayant le sens qu'on lui donne quand on dit que le flux d'électricité le long d'un conducteur métallique est continu), mais qu'elles sont toujours disruptives et périodiques, les périodes se succédant très rapidement. Il a paru désirable de soumettre à un examen spécial une forme de décharge dans laquelle la périodicité, beaucoup moins rapide, est produite par des moyens artificiels qui permettent de faire varier la durée de la période. De même que le mathématicien est souvent obligé de raisonner du discontinu au continu, du polygone à la courbe, de même le physicien arrivera mieux aux causes des phénomènes qui accompagnent les décharges ordinaires dans le vide (qu'elles soient absolument ou à peu près continues) par l'étude des phénomènes de décharges intermittentes se succédant rapidement. Enfin, si la décharge dans le vide est réellement discontinue, cette façon de procéder conduit à une chaîne non interrompue de phénomènes depuis l'étincelle simple de décharge de la bouteille de Leyde jusqu'à la colonne striée la plus fixe que l'on puisse obtenir avec un courant de pile.

L'ÉTAT SENSITIF EST DU A DES INTERMITTENCES

Le premier résultat auquel sont arrivés les auteurs est le suivant :

L'état sensitif est dû à des intermittences périodiques, très rapides et très régulières, la quantité d'électricité étant assez petite dans chaque décharge individuelle pour que la décharge soit instantanée.

Le moyen le plus simple de produire des intermittences est d'illuminer le tube avec une machine de Holtz ou toute autre source constante d'électricité, et d'interposer dans l'un des fils qui relie le tube à la machine une petite étincelle éclatant dans l'air (fig. 221).

Aussitôt que l'on introduit cette étincelle, la décharge

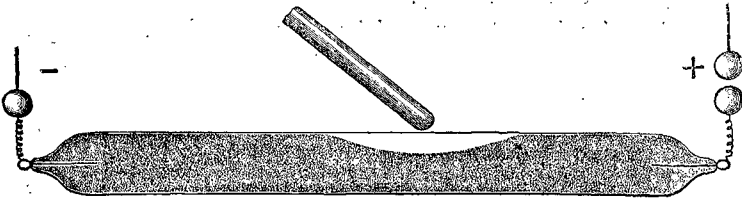


FIG. 221.

dans le tube passe à l'état sensitif; et on peut, en général, accroître cette sensibilité en augmentant la longueur de l'étincelle d'air, jusqu'à ce que la décharge devienne visiblement intermittente et ne fasse plus sur l'œil l'impression d'une décharge continue fixe. Quoique ce moyen ne soit pas le seul qui permette de produire la décharge sensitive, c'est, d'une façon générale, celui qui est le plus commode pour faire des expériences; et on peut, par suite, le considérer comme le mode type de production de ce phénomène.

On peut obtenir encore des traces d'état sensitif en employant une bobine d'induction reliée à un condensateur de grande surface.

Si on fait passer la décharge à travers le tube pendant que la bobine fonctionne, on constate d'habitude une certaine sensibilité. Mais si on arrête la bobine et si on fait passer le courant du condensateur dans le tube sans qu'il soit troublé par l'entrée des décharges de la bobine, on trouve, en général, que la décharge a perdu toute sa sensibilité.

Certains tubes paraissent rendre sensitive la décharge

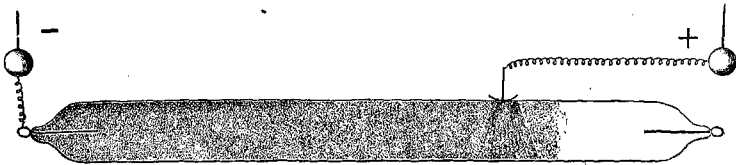


FIG. 222.

d'une source continue, sans qu'il soit nécessaire de produire dans le courant des intermittences artificielles.

On peut encore produire une décharge sensitive en reliant une des électrodes d'une machine à l'une des électrodes d'un tube vide, et l'autre électrode de la machine à l'extérieur du tube (fig. 222). Si alors on fait passer le courant entre les électrodes de la machine, en lui faisant franchir une couche d'air considérable, un demi-pouce (12,7 millimètres), par exemple, en sorte que les décharges soient produites dans le tube partie par conduction depuis une des électrodes de la machine jusqu'à l'extérieur du tube, partie par induction due aux alternatives rapides de haute et de faible tension dans le fil depuis l'autre électrode de la machine jusqu'à l'extérieur du tube, la décharge résultante sera sensitive.

On peut encore produire, au moyen de l'« interrupteur à roue » (vol. II, p. 104), des intermittences rapides, et, par suite, la sensibilité dans une décharge qui, sans cela, aurait été continue. Si on introduit l'interrupteur dans le circuit d'une machine de Holtz pendant qu'elle produit une décharge lumineuse dans un tube vide, et qu'on le

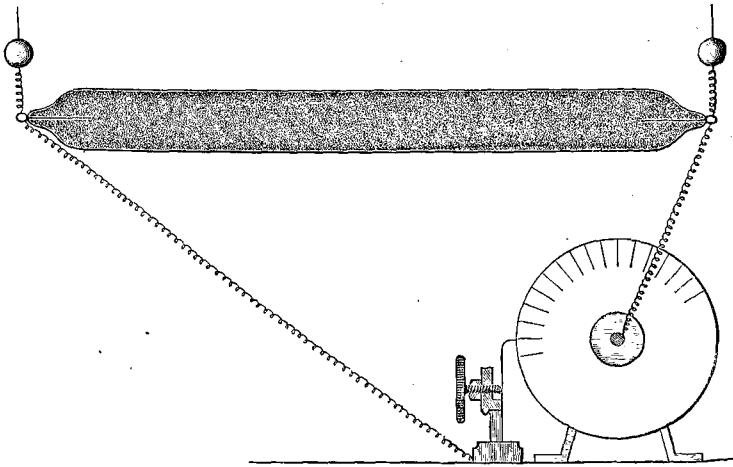


FIG. 223.

fasse marcher à grande vitesse, de manière à interrompre le courant de 400 à 2000 fois par seconde, la décharge devient très sensitive. L'interrupteur à roue sert comme dérivation, c'est-à-dire qu'il détourne du tube le courant fourni par la machine pendant que le ressort de platine frotte contre la partie métallique de la roue. De cette manière, le courant n'est jamais complètement interrompu, et un grand avantage de cette disposition est de produire simplement des intermittences dans la décharge dans le tube sans apporter aucun autre changement.

Une autre manière de produire l'état sensitif consiste

dans l'emploi de l' « interrupteur rapide (1) ». Si on emploie cet instrument avec une bobine d'induction, la décharge, quoiqu'elle présente souvent de fort belles stries, est extrêmement sensitive. La limite inférieure de la vitesse avec laquelle les auteurs ont produit des décharges *stratifiées* sensibles est de 240 interruptions par seconde.

IL N'Y A PAS DE SENSIBILITÉ SANS INTERMITTENCES

Les auteurs ont examiné un grand nombre de décharges sensibles au moyen d'un téléphone et d'un miroir tournant, et, dans tous les cas, ils ont trouvé que l'intermittence était une condition nécessaire à la sensibilité.

Le miroir tournant était employé de la façon qui a été décrite vol. II, p. 148. Si le corps du tube dans lequel se fait la décharge est caché par un écran qui présente une étroite fente longitudinale, et que l'on observe cette fente dans un miroir plan tournant rapidement, on aperçoit une série de bandes lumineuses et obscures toutes les fois que la décharge est sensitive, ce qui montre qu'entre les décharges lumineuses il y a des intervalles pendant lesquels le tube est obscur. Si on observe de la même manière la décharge ordinaire qui n'est pas sensitive, on n'aperçoit pas ces bandes obscures, et la vitesse imprimée au miroir n'est jamais suffisante pour montrer quelque interruption dans l'uniformité de l'image lumineuse de la fente. L'existence de ces bandes obscures est donc une preuve concluante que la décharge qui les produit est intermittente et discontinue.

Quand un téléphone est introduit dans le circuit d'un

(1) Vol. II, p. 105.

tube non sensitif, on entend quelquefois un son bruyant, mais en général le silence est absolu. Aussitôt que la décharge devient sensitive, le silence est rompu par un son aigu; ou, si le bruit dont nous avons parlé se produisait auparavant, il y a aussitôt un changement dans le caractère de ce son, qui d'ordinaire devient musical. La note est toujours très élevée et varie avec les circonstances de la décharge; il est donc probable que, dans les cas où on ne l'entend pas, c'est qu'elle est trop haute ou peut-être aussi trop faible pour pouvoir être perçue. Si on supprime l'étincelle dans l'air, la note cesse ou bien fait place au son bruyant que nous avons mentionné plus haut.

On a remarqué que toutes les méthodes qui permettent de produire la décharge sensitive sont d'accord non seulement en ce qui concerne l'intermittence de la décharge, mais aussi sur la courte durée des décharges individuelles: les auteurs ont été ainsi amenés à considérer la *petitesse de la durée*, comme un caractère des décharges individuelles produisant l'état sensitif aussi essentiel que la rapidité ou la régularité des intervalles qui séparent ces décharges.

Ces derniers caractères ont plus d'importance pour rendre l'état sensitif persistant pendant un intervalle de temps fixé que pour le produire, car des expériences faites avec beaucoup de soins n'ont pas réussi à établir l'existence d'une limite inférieure dans la vitesse de périodicité nécessaire à la production d'une décharge de cette nature. En fait, il n'est pas impossible d'obtenir, avec une seule étincelle, une décharge ayant un caractère de sensibilité. Si une bouteille de Leyde chargée (1) est em-

(1) *Proc. Roy. Soc.*, XXVI, 1877, p. 99

ployée avec un tube convenable, la décharge instantanée qui traverse le tube, lorsqu'on la relie à la bouteille, présente toutes les apparences de la sensibilité pendant son passage dans le tube.

Les auteurs exposent ensuite que : *l'effet produit sur une décharge sensitive par l'approche d'un conducteur a pour cause immédiate la détente (relief) qu'amène la présence de ce conducteur dans la tension électrique instantanée établie à l'intérieur et autour du tube par le passage des décharges individuelles à travers le tube.*

Dans le cas de la décharge sensitive ou interrompue, nous avons vu que des pulsations électriques séparées passent entre les électrodes. Il est probable que chacune de ces pulsations quitte l'électrode positive sous forme d'électricité libre.

S'il en est ainsi, cette décharge exercera des effets d'induction dans toutes les directions et produira un « état de déformation » dans le verre et dans tout l'espace au delà.

Comme le verre n'est pas conducteur, cet état de déformation persiste : mais aussitôt qu'on approche un corps conducteur, cet état de déformation éprouve une *détente (relief)* et une distribution complètement nouvelle de l'électricité se produit à l'extérieur du tube. L'état du champ électrique, dans le voisinage du conducteur, sera donc différent de ce qu'il est dans les autres parties du tube, et il réagira à son tour sur la décharge ou sur la matière gazeuse qui est à l'intérieur du tube.

Pour montrer que les phénomènes de sensibilité sont dus, en premier lieu, à la redistribution de l'électricité

induite et à la détente de l'état de déformation externe, il suffit de remarquer qu'un corps non conducteur, même fortement chargé, n'exerce aucune action sur la décharge sensitive. De même, un conducteur de petites dimensions, en contact avec le tube (un morceau de feuille d'étain, par exemple), n'agit pas sur la décharge tant qu'il est isolé. Mais si cette feuille d'étain est reliée à la terre ou à un conducteur éloigné, l'effet sur la décharge sensitive se manifeste aussitôt.

La considération de ces faits d'expérience a conduit les auteurs aux conclusions suivantes :

1° L'effet est dû à une redistribution de l'électricité dans le conducteur ;

2° Cet effet est périodique.

Si l'existence d'un état électrique permanent dans le corps extérieur était la condition nécessaire du phénomène, l'effet observé pourrait être produit par des corps non conducteurs chargés. Comme ce n'est pas le cas, c'est donc dans la facilité avec laquelle se produisent les changements d'état électrique dans les corps conducteurs qu'il faut chercher l'explication de leur effet sur la décharge sensitive. A l'appui de cette conclusion vient encore ce fait, que nous avons déjà signalé, que la feuille d'étain, placée sur le tube, n'exerce aucune action tant qu'elle est isolée. Une telle feuille d'étain présente trop peu de surface pour qu'il s'opère une nouvelle distribution de l'électricité, du moins une distribution susceptible d'avoir quelque influence sur l'espace environnant. Mais si on la réunit métalliquement à un corps conducteur éloigné, de façon que l'électricité positive ou négative de la feuille puisse être repoussée à une distance sensible du tube, on est dans des conditions bien différentes ; et, en établissant

cette communication, on constate aussitôt une action sur la décharge sensitive:

Si l'effet produit sur la décharge sensitive est dû à la facilité avec laquelle l'électricité prend une distribution nouvelle dans le conducteur, il en résulte que la décharge qui traverse le tube doit exercer sur ce conducteur un effet électrique variable. Or, on peut montrer qu'il en est ainsi en reliant à la terre un anneau ou segment d'anneau fait avec une feuille d'étain et placé sur le verre ou dans le voisinage (fig. 224), avec un téléphone interposé dans

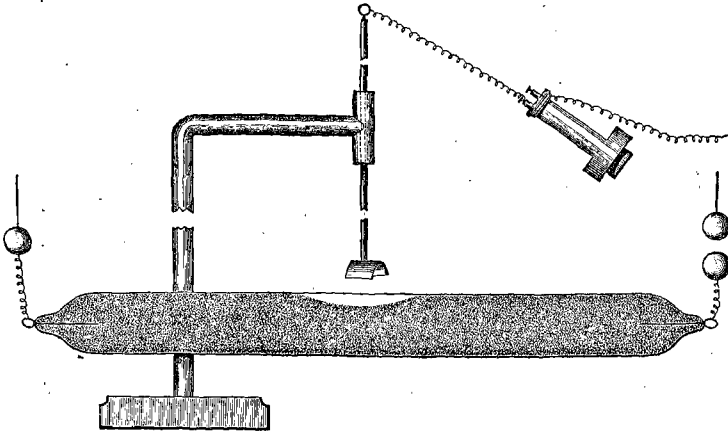


Fig. 224.

le circuit entre la feuille d'étain et la terre. Aussitôt que le courant est interrompu par une étincelle éclatant dans l'air, on entend dans le téléphone un son correspondant au son de l'étincelle qui produit l'intermittence. C'est là une preuve concluante qu'à chaque pulsation il y a une distribution nouvelle d'électricité sur le système composé de la terre, du fil et de la feuille d'étain. Et comme ce phénomène peut se prolonger indéfiniment sans que la

feuille d'étain prenne de charge, il faut évidemment que, durant chaque période complète de pulsation, il y ait un flux d'électricité d'une certaine espèce partant de la feuille d'étain, suivi d'un flux de retour ou d'un flux de même sens que le premier, mais d'électricité d'espèce contraire.

Les auteurs continuent en décrivant des expériences destinées à établir que :

1° Les effets sont dus à l'induction électro-statique, et non à l'induction électro-magnétique (1);

2° L'« effet de détente » est indépendant du potentiel du conducteur qui le produit.

C'est-à-dire que, si la détente est causée par un anneau de feuille d'étain appliqué sur le tube et relié par un fil à l'armature intérieure d'une bouteille de Leyde un peu grande, il est indifférent que cette armature soit mise à la terre, ou isolée et chargée à un potentiel quelconque, positif ou négatif. Il y a plus : l'effet de détente s'obtient également bien lorsque l'anneau est relié à un grand conducteur de potentiel variable, tel que le fil d'une bobine d'induction, par exemple, pourvu que la période de ses variations ne soit pas la même que celle qui produit les intermittences de la décharge (2).

(1) Car on obtient ces effets avec un anneau étroit d'étain et, par suite, sans que la feuille d'étain s'étende dans la direction du tube, c'est-à-dire dans la direction du courant. Si une bobine de fil isolée est placée près du tube ou autour du tube, on n'a aucune différence dans l'effet en joignant ensemble les bouts du fil; la bobine isolée agit comme une simple masse métallique. L'effet tient simplement aux dimensions du conducteur, et la forme de conducteur la plus favorable est un anneau étroit de feuille d'étain relié à la terre par un fil fin de cuivre perpendiculaire au tube, et cependant aucun système conducteur n'est plus défavorable pour la production de courants qui seraient induits électro-magnétiquement par le courant qui traverse le tube.

(2) L'arrangement dans lequel la feuille d'étain est reliée à la terre est celui qui apporte la détente la plus complète aux changements périodiques

Les auteurs ont ensuite établi par expérience que :

Lorsque l'intermittence est produite près de l'électrode positive, l'effet de détente prend la forme d'une répulsion ou d'une décharge partant de la surface interne du verre. Sous ces deux formes, la nature de l'effet est la même, et, dans un même tube, la forme qu'il prend ne dépend que de l'intensité de l'action qui le produit (1).

de tension électrique causés par les pulsations périodiques d'électricité à travers le tube, car la terre agit comme un conducteur infini au potentiel zéro ; mais on peut obtenir une détente complète sans que le conducteur qui la produit soit au potentiel zéro, et un conducteur de dimensions suffisantes relié à l'étain donne le même effet que la terre, quel que soit son potentiel. L'expérience suivante en donne une preuve péremptoire :

Une machine de Holtz étant prise comme source de courant, interposons une étincelle d'air entre le tube et l'électrode + de la machine, et plaçons sur le tube l'anneau d'étain relié à la terre : on observera l'effet de détente. Ni le courant, ni l'effet de détente ne seront modifiés en reliant l'une ou l'autre des électrodes de la machine à la terre. Que le courant ne soit pas modifié, cela n'est pas étonnant ; car les effets électro-dynamiques ne dépendent que de la différence des potentiels des deux électrodes et non de leurs valeurs absolues ; mais il est très remarquable que l'effet de détente soit le même dans les deux cas ; car, dans un cas, l'étain a le même potentiel que le pôle + de la machine, c'est-à-dire un potentiel plus élevé que toute autre partie du circuit ; et, dans l'autre, il a le potentiel du pôle —, potentiel nécessairement plus petit que celui de toute autre partie de circuit.

Le terme *effet de détente* (relief) ne signifie pas autre chose que l'effet, sur la décharge lumineuse, d'un conducteur voisin du tube, et dont le potentiel reste plus ou moins complètement invariable, malgré les perturbations du tube ; on l'a choisi parce que la déformation électrique dans l'étain éprouve une détente quand on le relie à un grand conducteur.

On obtient encore cet effet en *reliant la feuille d'étain à l'une ou l'autre des électrodes de la machine qui fournit le courant*, ou à une bobine d'induction dont le fonctionnement est indépendant, ou à un fil traversé par un courant avec une étincelle d'air indépendante.

(1) L'approche d'un conducteur produit donc deux types d'effets qu'indique la figure 225 : 1^o forme *répulsion*, la colonne lumineuse est repoussée par le conducteur ; 2^o forme *décharge*, la luminosité semble se précipiter vers le conducteur, offrant habituellement l'aspect de deux languettes qui s'approchent du verre sans le toucher nécessairement ; il y en a une de chaque côté de l'endroit où le conducteur est le plus près du verre, et entre les deux languettes apparaît une nébulosité lumineuse semblable à celle qui environne habituellement l'électrode négative. La colonne lumineuse n'est pas toujours

Ils ont aussi reconnu que l'on peut faire passer constamment l'effet de détente de la forme répulsion à la forme décharge, par un des trois procédés suivants :

1° En maintenant fixe au même point du tube le système qui produit l'effet de détente, et faisant varier la grandeur de cette détente (1), la décharge restant la même ;

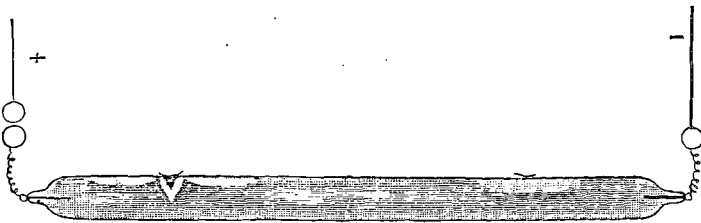


FIG. 225.

2° En maintenant constant le système qui produit la détente et faisant varier sa position sur le tube, la décharge restant la même ;

3° En maintenant constant et dans une position fixe le système qui produit la détente, et faisant varier la période d'intermittence de la décharge.

Toutefois, on a remarqué que certains tubes donnent seuls l'effet de décharge, tandis que tous donnent celui de répulsion.

interrompue tout à fait, les deux languettes étant réunies à leurs bases par le reste de la colonne, mais cette partie de la colonne est moins brillante que les autres : l'un ou l'autre des éléments de la décharge disparaît souvent ; les languettes sont très faibles, la nébulosité invisible, etc.

La forme décharge peut être regardée comme un effet de répulsion très intense ; ainsi, en reliant à la terre une petite feuille d'étain courbe, comme dans la figure 224, et la rapprochant peu à peu du tube, on a un effet de répulsion à distance et de décharge au contact.

(1) Par exemple, en établissant un contact imparfait entre la feuille d'étain et le fil de terre.

DE L'EFFET SPÉCIAL OU EFFET DE NON-DÉTENTE (NON-RELIEF)
 PRODUIT SUR LA DÉCHARGE LUMINEUSE SENSITIVE QUAND
 ON LA RÉUNIT A L'ÉLECTRODE OU ÉCLATE L'ÉTINCELLE.

Supposons d'abord que les intermittences soient produites par une interruption du circuit entre la source d'électricité et l'électrode positive du tube. Pour plus de commodité, nous désignerons cette disposition en appelant électrode positive *l'électrode de l'étincelle dans l'air*.

Si on attache un fil métallique à un morceau de feuille d'étain appliqué sur le tube, et si on relie ce fil à un système conducteur indépendant, on obtient, ainsi qu'on l'a vu, des formes plus ou moins complètes de l'effet de détente. Dans la plupart des cas, le fil et la feuille d'étain repoussent tous deux la colonne lumineuse. Mais si le fil est relié à *l'électrode positive* du tube, il se produit dans le phénomène un changement soudain. Au lieu de repousser la colonne lumineuse, le fil trace son parcours le long du tube (à supposer qu'il repose en partie sur le tube) par une ligne lumineuse brillante sur la surface interne du tube, comme s'il avait attiré la colonne lumineuse au lieu de la repousser. L'effet de la feuille d'étain est changé d'une façon tout aussi remarquable. Au lieu de la répulsion qui s'exerçait auparavant, on voit une langue de luminosité qui semble partir de la surface intérieure du tube située sous l'étain, et qui s'étend vers l'électrode négative, tandis que du côté positif de l'étain la colonne lumineuse est généralement déprimée ou repoussée, et souvent presque coupée en deux. Si la feuille d'étain est en forme d'anneau entourant le tube, l'aspect du phénomène est très frappant. Dans bien des cas, la colonne lumineuse qui s'étend depuis l'électrode positive se termine brusquement par un contour nettement

arrêté et légèrement arrondi à l'extrémité. Autour de cette extrémité, est un cône lumineux creux, bien marqué, partant de la paroi du tube située juste au-dessous de l'anneau d'étain, brillant et nettement arrêté à l'extérieur, nébuleux et bleuâtre à l'intérieur ; il est tourné vers l'extrémité de la colonne positive précédemment décrite, qu'il entoure par le fait. Ce cône creux ne se termine pas en pointe à sa surface extérieure, mais il se fond avec une colonne lumineuse s'étendant vers l'électrode négative du tube et tenant la place de la première colonne lumineuse, à laquelle elle ressemble à tous égards (fig. 226). Si on augmente beaucoup

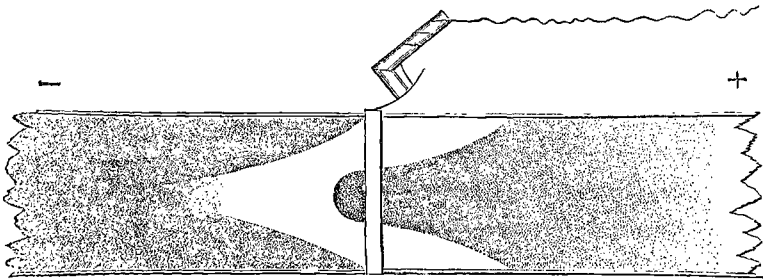


FIG. 226.

la longueur de l'étincelle, la colonne lumineuse tronquée est très modifiée (1).

On observera que ces effets diffèrent totalement des effets de détente.

(1) Lorsque l'étincelle d'air est dans la partie négative du circuit, on observe aussi un grand contraste entre les effets obtenus, suivant qu'on relie la feuille d'étain à la terre ou à l'électrode du tube où se trouve l'étincelle d'air. On peut obtenir comme précédemment des effets de détente en reliant la feuille à un conducteur de capacité suffisante et de potentiel quelconque, pourvu que les variations de potentiel du conducteur ne soient pas copériodiques avec celles du tube, et des effets spéciaux ou de non-détente en reliant l'étain à l'électrode — du tube. Mais les caractéristiques des deux effets sont changées, comme on le verra plus loin.

EXPLICATION DE LA DIFFÉRENCE

On peut se rendre compte de cette différence comme il suit :

Chaque fois que la décharge passe, il y a une pulsation d'électricité positive libre qui traverse le tube.

Dans le cas de l'effet de détente, elle est accompagnée chaque fois d'une pulsation d'électricité positive chassée de la feuille d'étain.

Dans le cas de l'effet de non-détente, elle est accompagnée d'une pulsation d'électricité positive chassée vers la feuille d'étain, en sorte que la déformation électrique, au lieu d'éprouver une détente, est accrue par l'action de la feuille d'étain.

EXAMEN DE L'EFFET DE NON-DÉTENTE

La forme de l'effet de non-détente que l'on obtient en rendant positive l'électrode du tube où éclate l'étincelle peut être prise comme type de toutes les autres formes.

Si on met autour du tube un anneau étroit de feuille d'étain, et qu'on le relie à l'électrode positive du tube (où l'on suppose qu'éclate l'étincelle), au moyen d'un fil passant à une distance suffisante pour ne pas exercer d'action directe sur la colonne lumineuse, on remarque les apparences suivantes :

1° La colonne qui part de l'électrode positive se termine brusquement en une colonne brillante de petit diamètre occupant le centre du tube. Cette colonne est généralement striée et se termine par une strie à tête ronde.

2° Du côté de la feuille d'étain qui s'étend vers le bout négatif du tube, une colonne lumineuse conique part de la paroi intérieure du tube, juste au-dessous de l'étain, et

s'étend vers l'électrode négative. En fait, ce cône forme la base de la nouvelle colonne positive.

3° En examinant ce cône, on reconnaît qu'il est creux et que l'intérieur a une surface mal définie et nébuleuse, qui contraste fortement avec le profil net et régulier de l'extérieur (fig. 226).

Les auteurs recherchent ensuite l'explication de ces apparences. On sait que l'électricité positive arrive à l'électrode positive du tube et à la feuille d'étain par pulsations énergiques qui concordent avec les passages des étincelles. Quand ces pulsations arrivent à l'électrode, elles ont une intensité suffisante pour faire passer la décharge dans le tube, et les pulsations qui arrivent à la feuille d'étain doivent être exactement de même force que celles qui arrivent à l'électrode. Ces pulsations doivent chasser, sous forme de pulsations correspondantes, l'électricité positive des parties intérieures du tube contiguës à la feuille d'étain. Ces dernières pulsations sont semblables aux décharges qui partent de l'électrode positive, et elles cherchent à se détendre de la même manière, c'est-à-dire en se précipitant vers l'électrode négative du tube; c'est alors qu'elle forment le cône creux de lumière dont il a été question plus haut. Ces décharges d'électricité positive, venant de la surface intérieure du tube, laissent derrière elles un excès d'électricité négative, qui serait retenue prisonnière par la charge positive de la feuille d'étain si cette charge était permanente; mais, dès que cette dernière a été engendrée par la charge instantanée due au passage de l'étincelle, l'électricité négative est mise en liberté par la détente qu'amène, dans cette charge, la décharge à travers le tube. Quand cette décharge a eu lieu, l'électricité négative devient libre à l'intérieur du tube, et neutralise à son tour l'électricité

positive qu'elle rencontre venant de l'électrode positive. Ainsi se termine naturellement la colonne positive du côté de la feuille d'étain qui est le plus voisin de l'électrode positive, et il y a une discontinuité complète entre cette colonne et la seconde, qui part en forme de cône creux du bord de la feuille d'étain le plus voisin de l'électrode négative.

Pour montrer que c'est bien là la véritable interprétation du phénomène et que l'effet de l'arrangement est de substituer à la décharge primitive deux décharges indépen-

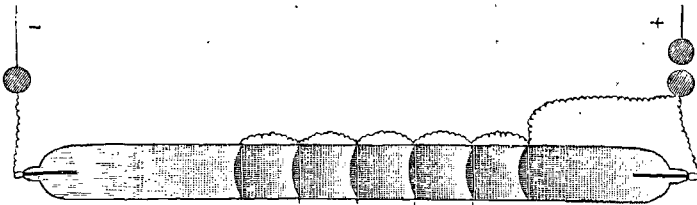


FIG. 227.

dantes, occupant des parties différentes du tube, prenons deux ou plusieurs de ces anneaux, séparés l'un de l'autre par un intervalle un peu plus petit que le diamètre du tube, et relierons-les, comme précédemment, à l'électrode positive (fig. 227). On trouve que chacun de ces anneaux est la base d'un cône creux semblable à ceux que l'on a décrits plus haut ; et chacun de ces cônes sort de base à une colonne lumineuse ayant tous les caractères d'une colonne positive et se terminant nettement derrière l'anneau suivant, ou aux limites de l'espace obscur négatif qui se trouve habituellement près de l'électrode négative du tube.

Si on approche de la paroi du tube le doigt ou un autre conducteur, toutes ces colonnes montrent de la sensibilité,

mais chacune se meut indépendamment des autres et du reste de la colonne positive, et se comporte comme si elle partait de l'anneau qui est à sa base, tout en conservant

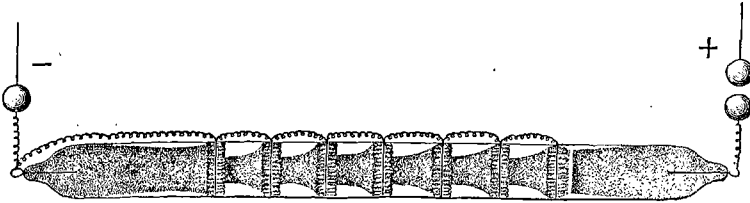


FIG. 228.

toujours sa position relativement aux colonnes partielles situées sur ses deux côtés. Si on approche un aimant, il dévie toutes les colonnes, mais chacune d'elles se meut aussi indépendamment.

* DE L'EFFET DE DÉTENTE ET DE L'EFFET SPÉCIAL QUAND
L'ÉTINCELLE D'AIR EST NÉGATIVE

Nous avons supposé jusqu'ici que l'étincelle d'air, ou la cause qui produisait l'interruption du courant, était située dans la partie positive du circuit extérieur, c'est-à-dire entre l'électrode + du tube et la source électrique. On observe encore les mêmes phénomènes lorsque l'étincelle, ou la cause d'intermittence, est située dans la partie négative du circuit : seulement, les caractéristiques des deux effets sont changées.

Les auteurs démontrent que

L'effet spécial de l'étincelle + est identique à l'effet de détente de l'étincelle — ; et que

L'effet de détente de l'étincelle + est identique à l'effet spécial de l'étincelle — .

Pour cela, ils examinent les formes que prennent les

effets de détente et de non-détente quand on fait varier les intensités des causes qui les produisent :

1° En faisant varier la longueur de l'étincelle d'air de zéro à la limite de la distance explosive ;

2° En faisant varier la distance au tube du morceau de feuille d'étain qui produit l'effet, depuis la distance la plus grande à laquelle cet effet se manifeste jusqu'au contact avec le tube ;

3° En déplaçant la feuille d'étain le long du tube à des distances plus ou moins grandes de l'électrode de l'étincelle.

On observe ainsi successivement les phénomènes de non-détente avec l'étincelle d'air dans la partie positive du circuit (1), puis les phénomènes de détente avec l'étincelle d'air dans la partie négative du circuit, et on reconnaît que les phénomènes sont identiques.

Cette identité d'effets vérifie l'exactitude des conclusions antérieures :

L'effet spécial avec l'étincelle $+$ est causé par des pulsations d'électricité $+$ arrivant à l'étain copériodiquement avec les élévations du potentiel à l'électrode $+$ produites par le passage des charges électriques à travers l'étincelle d'air ; si l'étain est relié à la terre et l'étincelle d'air négative (effet de détente avec l'étincelle $-$), les pulsations d'électricité $+$ qui produisent cet effet sont dues à l'action in-

(1) Quand on fait croître alors l'étincelle à partir de la valeur zéro, on aperçoit d'abord une illumination brillante de la partie centrale de la colonne positive dans la partie du tube voisine de l'anneau d'étain et du côté de l'électrode $+$ du tube ; on observe ensuite la division de la colonne en deux parties, les effets du cône creux et de la terminaison brillante de la colonne lumineuse. Si on augmente encore davantage l'étincelle d'air, la strie terminale en tête de la colonne devient plus large, à peu près de même diamètre que le tube, plus brillante sur les bords, et en réalité devient annulaire. Elle se rapproche de l'étain et finit par disparaître.

ductive des charges négatives qui s'élancent de l'électrode — du tube.

De même, l'effet de détente positif est identique à l'effet spécial négatif; ce sont, dans les deux cas, des pulsations d'électricité — qui arrivent dans la feuille d'étain et qui sont causées dans l'un des cas par l'action inductive de la décharge positive qui traverse le tube, et qui dans l'autre proviennent directement de l'électrode du tube reliée métalliquement à l'étincelle d'air. Ainsi, avec l'étincelle d'air —, si on relie l'anneau d'étain à l'électrode —, on a un étranglement de la colonne lumineuse, résultant de la formation d'un espace obscur entre la partie centrale de la colonne et la partie de l'intérieur du tube qui se trouve au-dessous même de l'anneau.

C'est un phénomène analogue à celui de répulsion, car l'apparence observée tient à la forme d'anneau donnée à l'étain.

On a reproduit également, avec la même disposition et un tube convenable, la décharge bleue caractéristique des effets de détente quand l'étincelle est + : en examinant cette décharge au-dessous de l'étain, on voit qu'elle est séparée du verre de la même manière que la lueur qui apparaît à l'électrode négative d'un tube est séparée de l'électrode elle-même par le petit espace obscur de Crookes. Au contraire, quand les effets sont dus à des impulsions positives, la luminosité part de la surface même du verre, de même que la lueur à l'électrode positive semble partir de la surface même de l'électrode.

L'effet spécial négatif avec l'anneau d'étain est alors identique à l'effet qui serait obtenu si l'électrode du tube était un anneau métallique fixé à la surface intérieure du tube juste au-dessous de l'étain, et si cette électrode était

reliée à une source électrique et servait à produire des décharges ordinaires dans le tube.

En résumé, les quatre effets se divisent en effets causés par les pulsations positives et effets causés par les pulsations négatives, et ces effets sont respectivement ceux d'une électrode positive et d'une électrode négative qui seraient placées dans le tube au-dessous de l'étain.

Nous arrivons maintenant à la partie la plus importante peut-être du mémoire.

NATURE DES STRIES ET PRODUCTION ARTIFICIELLE DES STRIES DANS LA DÉCHARGE LUMINEUSE SENSITIVE

Nous avons vu que la décharge positive due à l'anneau d'étain forme un cône creux dont la surface extérieure est lumineuse et à contours arrêtés. Si l'électrode négative la plus voisine est l'électrode négative du tube, ce cône se transforme en une colonne de luminosité diffuse, semblable à tous égards aux colonnes lumineuses ordinaires qui partent de l'électrode positive du tube.

Mais, s'il y a un autre anneau d'étain semblable, relié à l'électrode positive (nous supposons toujours que l'effet que l'on examine est l'effet spécial produit lorsque l'étincelle est dans le circuit positif) et placé entre le premier anneau et l'électrode négative, la colonne lumineuse qui part de l'anneau n° 1 est arrêtée par l'anneau n° 2, et de ce dernier anneau part un second cône creux de lumière, qui s'étend à son tour vers l'électrode négative, en formant une colonne lumineuse nouvelle, ainsi qu'on l'a décrit plus haut.

Si ces anneaux sont placés à une distance convenable les uns des autres, si les dimensions du tube et le degré

de raréfaction sont convenables, la colonne lumineuse courte située entre les anneaux se réduira à un cône creux dont le sommet arrondi est d'un éclat bien supérieur au reste du cône et qui s'étend jusqu'à un point voisin et quelquefois même un peu à l'intérieur du deuxième anneau, occupant ainsi le milieu de l'espace enfermé par la surface intérieure et nébuleuse du cône creux qui part de cet anneau.

En ajoutant encore des anneaux, on peut répéter ce phénomène dans les intervalles des anneaux précédents et diviser toute la colonne lumineuse en cônes ou surfaces lumineuses creuses, à sommet arrondi et brillant.

La théorie que proposent les auteurs du mémoire est que *chaque surface ou cône lumineux est une strie parfaite sous le rapport de la fonction et sous celui de la structure.*

La similitude d'aspect est frappante : même contour brillant dont la convexité est tournée vers l'électrode négative, même surface creuse mal définie, nébuleuse et bleue, tournée vers le cône qui la suit immédiatement ; mêmes intervalles sombres séparant les cônes successifs, comme ils séparent les stries successives. En réglant convenablement la longueur de l'étincelle, on peut aussi obtenir des stries plates et annulaires.

Mais ce n'est pas sous le rapport de la structure seulement que ces surfaces lumineuses ressemblent aux stries. Il y a aussi identité dans leurs fonctions. Nous savons que, lorsque les pulsations positives arrivent au verre, elles chassent dans l'intérieur du tube, par pulsations semblables, l'électricité positive qui forme ces surfaces lumineuses. Sachant donc que chaque surface lumineuse représente une décharge positive, sachant également qu'il ne passe

pas d'électricité à travers le verre, nous sommes absolument certains qu'une quantité égale d'électricité négative doit se condenser à la surface intérieure du verre et neutraliser à la fin une quantité équivalente d'électricité positive de la décharge originaire, c'est-à-dire de la décharge qui vient de l'électrode positive ou de la surface qui précède immédiatement du côté positif la surface que nous considérons. Nous avons ainsi une décharge négative partant de la paroi intérieure du tube ou du gaz qui la touche, laquelle neutralise une décharge positive cheminant vers elle le long du tube; nous voyons que l'effet est de faire cesser brusquement l'éclat lumineux de la décharge, qui se terminera alors par une tête arrondie, brillante, à contour arrêté, séparée par un espace obscur du siège de la décharge négative. Voici donc la fonction de la surface : la partie brillante sert de point de départ à l'électricité positive qui va traverser l'espace obscur (ou de point d'arrivée à l'électricité négative qui vient de le traverser); la partie nébuleuse de l'intérieur du cône est son point d'arrivée (ou le point de départ de l'électricité négative). Autant que nous pouvons le savoir, c'est là l'unique fonction de ces éléments de la surface lumineuse.

Considérons maintenant le cas d'une décharge stratifiée. Nous savons que dans ce cas aussi l'électricité positive du courant doit partir de la tête brillante de la strie, traverser l'espace obscur et arriver à la partie nébuleuse à l'intérieur de la strie suivante : l'électricité négative doit suivre ce chemin en sens inverse. Il y a identité absolue dans la fonction des parties correspondantes des deux phénomènes; la seule différence est que nous savons, grâce à une preuve extérieure indépendante, que, dans les décharges qui sont striées artificiellement, l'électricité ne passe

pas en courant continu, mais seulement par décharges intermittentes (1).

Revenant au cas des surfaces coniques produites par des moyens artificiels, voici quel est le mode de fonctionnement (*modus operandi*) de la décharge : lorsque la pulsation d'électricité positive arrive à l'électrode et produit la décharge dans le tube, une décharge positive égale (2) à celle qui passe dans le tube se meut synchroniquement de l'intérieur du tube à chacun des anneaux d'étain, forme la surface brillante ou strie et passe à la surface ou strie suivante, prenant ainsi la place de la pulsation positive que vient d'y émettre l'anneau d'étain. La dernière surface envoie sa décharge sur l'électrode négative et la première reçoit une décharge de l'électrode positive. De cette façon, il passe à travers le tube une décharge identique comme caractère et quantité à celle qui y pénètre par l'électrode positive.

Or, si nous sommes dans le vrai en supposant que la série de surfaces creuses produites artificiellement est identique comme rôle et structure aux stries, il n'est pas difficile, d'après les explications précédentes, de déduire le mode de fonctionnement (*modus operandi*) dans une décharge stratifiée ordinaire. On peut supposer que cha-

(1) En l'état actuel de leurs recherches, les auteurs admettent que toutes les décharges dans le vide sont réellement intermittentes. Celui qui ne voudrait pas faire cette supposition doit considérer les raisonnements de ce chapitre comme applicables seulement aux décharges que l'on sait être intermittentes.

(2) Il peut paraître un peu osé d'admettre que chacune de ces décharges stratifiées par des moyens artificiels est équivalente à la décharge totale primitive ; mais, dans des conditions convenables, il semble qu'il en soit ainsi, et, comme le raisonnement est simplifié et que la valeur de la théorie ne dépend point de cette hypothèse, nous admettrons dans le reste de ce chapitre qu'il en est effectivement ainsi.

cune des pulsations intermittentes, en passant de la surface brillante d'une strie à la surface creuse de la suivante, chasse par induction de la strie suivante une pulsation qui, à son tour, chassera une pulsation de la strie qui vient après, et ainsi de suite. Ainsi, les phénomènes sont exactement les mêmes dans les colonnes stratifiées naturelles et artificielles; à cela près que, dans les dernières, les pulsations se produisent d'une strie à l'autre en vertu d'une induction extérieure au tube, tandis que, dans les premières, l'induction est due à la décharge même dans son passage d'une strie à l'autre. Dans les deux cas, l'action qui cause le passage de la décharge consiste en une décharge se produisant indépendamment d'une strie à la suivante; on se figure très bien la nature de cette action en la comparant à une bande d'enfants passant un ruisseau sur des pierres : chacun d'eux met le pied sur la pierre que vient de quitter celui qui le précède.

Ainsi donc, dans une décharge stratifiée dans le vide, l'unité se compose de la surface brillante de la strie, de l'espace sombre qui est devant elle et de la surface nébuleuse à l'intérieur de la strie qui vient après l'espace obscur. Dans cette unité, nous avons une extrémité positive, un espace que la décharge traverse sans lumière et une extrémité négative. Dans l'opinion des auteurs du mémoire, toutes les décharges stratifiées dans le vide se composent de la répétition de cette unité; et tout phénomène dépendant de l'électrode négative qui paraîtrait en contradiction avec cette manière de voir et semblerait indiquer une structure spéciale de la décharge aux environs de l'électrode négative n'est qu'une simple modification due à des conditions accidentelles de l'électrode.

Les auteurs s'occupent ensuite de montrer que même la

« lueur négative » et « l'espace obscur négatif » (1) ne sont que des modifications d'une strie produites par le pôle négatif. Les auteurs regardent chaque segment comme formant une décharge séparée; et un phénomène qu'ils ont observé, et dont la nature diffère de celle des phénomènes dont nous nous sommes principalement occupés, paraît fournir un argument puissant en faveur de leurs idées. Si on approche un aimant d'une colonne stratifiée, celle-ci n'est pas simplement déviée tout d'une pièce d'un côté ou de l'autre, comme cela arriverait si la décharge passait en ligne directe d'une électrode à l'autre, traversant les stries sur son passage. Au contraire, chaque strie éprouve une rotation ou une déformation présentant exactement le même caractère que celle qui se produirait si chaque strie marquait la terminaison de courants flexibles rayonnant de la tête brillante de la strie qui est derrière elle et se terminant à la surface nébuleuse qui est à l'intérieur de la strie en question. Après avoir examiné différents cas, les auteurs du mémoire ont été amenés à conclure que les courants rayonnent ainsi de la tête brillante d'une strie à

(1) Autour de l'électrode négative de toute source de décharge négative se forme un espace obscur. Dans une colonne striée, on lui donne les noms de *espace de Crookes*, *espace obscur négatif* ou *espace des stries*, suivant qu'il se trouve dans la première unité physique de la décharge, dans la seconde ou dans les suivantes, en comptant à partir de l'électrode négative. L'extrémité négative de la première unité physique est l'électrode négative elle-même, son extrémité positive est la *lueur négative*, et entre les deux se trouve l'espace de Crookes. L'extrémité négative de la seconde unité physique est la nébulosité qui suit la lueur négative, puis vient ce qu'on appelle l'*espace obscur négatif*, qui dans cette seconde unité a une étendue exceptionnelle en raison de sa situation particulière. Dans la suite de leurs recherches, les auteurs donnent le nom d'*espace blanc* à l'espace obscur qui entoure toute source de décharge négative, quelle que soit la position de cet espace, que la décharge soit striée ou non. L'espace blanc caractérise une électrode négative, comme la luminosité positive caractérise une électrode positive.

la surface intérieure de la strie suivante, et qu'il n'y a pas de passage direct de l'une des électrodes du tube à l'autre.

STRUCTURE PHYSIQUE DES STRIES

Il est naturel de rechercher quelle est, dans cette théorie, la structure physique des stries. Sont-elles de simples apparences lumineuses, c'est-à-dire des lieux de maximum de luminosité, ou sont-elles des agrégations de matière ayant une structure physique ?

Les auteurs considèrent que ce serait sortir des limites de leur mémoire que de discuter cette question ; mais l'opinion la plus probable, d'après eux, est que ce sont des *milieux de parfaite porosité électrique, ayant une structure matérielle*. Un des faits les plus importants à l'appui de cette manière de voir est que, lorsque les stries sont formées par une bobine d'induction pourvue d'un interrupteur à grande vitesse, les stries produites par les deux courants de fermeture et de rupture adhèrent ensemble par paires d'une façon persistante, comme si les courants



Fig. 229.

alternatifs trouvaient des stries toutes prêtes et n'ayant besoin que d'une légère déformation pour devenir susceptibles de remplir leur fonction. Les auteurs ajoutent qu'il y a d'autres faits tendant à appuyer cette conclusion, mais qu'un examen complet de la question les entraînerait en dehors des limites de leur présent mémoire.

DURÉE DE LA DÉCHARGE

Le passage de la décharge à travers le tube prend un temps suffisamment petit relativement à l'intervalle des décharges, pour que les pulsations électriques successives ne puissent interférer.

Cette proposition a été établie en examinant la décharge dans un miroir tournant.

Pour vérifier si des pulsations isolées pourraient donner lieu aux phénomènes dont nous avons parlé, on a fait l'expérience suivante : les électrodes d'un tube furent reliées aux armatures intérieure et extérieure d'une petite bouteille de Leyde. Les pôles du circuit secondaire d'une bobine furent disposés de façon que la décharge de la bobine chargeât la bouteille, en éclatant à travers des espaces considérables ($\frac{1}{4}$ de pouce, soit 6,3^{mm} environ, pour le pôle négatif; $\frac{3}{8}$ de pouce, soit 19^{mm}, pour le pôle positif) : les courants de fermeture étaient ainsi éliminés. Lorsqu'on faisait fonctionner la bobine, on obtenait une décharge brillante, due à la décharge périodique de la bouteille à travers la colonne. Une fente étant placée devant le tube, on examinait la colonne lumineuse dans le miroir tournant; on a trouvé que la décharge était instantanée et qu'en général il n'y avait pas entre elle et la suivante d'intervalle régulier, mais que quelquefois elle était multiple. Cette décharge fut examinée au point de vue des deux effets de détente et de non-détente, et les produisit tous deux d'une façon très marquée, malgré la grande quantité d'électricité qui passait à chaque décharge. L'interrupteur fut alors actionné à la main, de manière à ne donner que de simples étincelles. Elle furent examinées au point de vue de la sensibilité et trouvées parfaitement

sensitives. Ainsi, *il résulte de l'expérience que l'effet de détente et l'effet de non-détente se produisent en entier dans chaque pulsation et que l'effet de la répétition rapide des décharges est seulement de donner l'apparence de la permanence à des phénomènes qui, en réalité, paraissent et disparaissent à chaque décharge.*

NATURE DE LA DÉCHARGE

Dans les circonstances ordinaires, la décharge se produit par le passage à travers le tube, à partir de l'électrode où jaillit l'étincelle dans l'air, d'électricité libre de même nom que l'électricité de cette électrode.

Les auteurs établissent cette proposition par de nombreuses expériences, dont voici les deux plus importantes :

1° Si un morceau de feuille d'étain est placé *en un point quelconque* du tube, même au bout le plus éloigné de celui où jaillit l'étincelle, l'effet de détente montrera que la pulsation d'électricité est de la même espèce en tout point à l'intérieur du tube.

2° Pour établir la proposition d'une autre manière, un tube à vide fut placé dans un globe de métal (les fils arrivant aux électrodes du tube à vide en passant à travers des tubes de matière isolante, pénétrant par deux petits trous percés dans le globe) et un téléphone fut mis en circuit entre le globe et la terre.

Lorsqu'on envoyait à travers le tube une décharge dans le circuit extérieur de laquelle se trouvait une étincelle d'air, on entendait dans le téléphone un bruit semblable à celui de l'étincelle. En vertu d'une proposition fondamentale en électricité (1), l'électricité libre à la surface

(1) Voir vol. I, p. 23.

du globe (qui s'écoulait à la terre à travers le téléphone), était à chaque instant égale à l'excès d'une espèce d'électricité sur l'autre dans l'espace compris à l'intérieur du globe. Si la décharge avait été conductive, comme dans un courant galvanique, il n'y aurait eu à aucun instant excès d'une espèce d'électricité, et, par suite, il n'y aurait pas eu de son dans le téléphone. La production d'un son prouve des variations dans la somme algébrique des électricités libres dans le tube. Pour montrer que ce son n'était dû à rien qui dépendit des fils conducteurs arrivant au tube, on répéta la même expérience avec un tube dont la partie médiane était reliée aux parties extrêmes par des passages très étroits. La partie médiane était placée dans le globe, les parties étroites passant dans de petits trous percés dans les parois du globe, en sorte qu'il n'y avait qu'une partie du tube entier dans l'intérieur du globe. On a obtenu les mêmes résultats avec cette disposition.

DES DÉCHARGES UNIPOLAIRES

Nous avons vu que la décharge partant de l'électrode où jaillit l'étincelle produit son effet spécial jusqu'à l'autre électrode sans confusion ni défaut de netteté : il semblerait donc que les décharges venant des deux électrodes sont tellement indépendantes que la décharge pourrait venir d'une électrode et l'électricité libre passer tout droit jusque dans le voisinage immédiat de l'autre électrode sans évoquer de cette dernière électrode une réponse spécifique. Ou bien, si chaque décharge de ce genre appelle de la part de l'autre électrode une réponse spécifique, elle est si faible qu'elle ne change pas matériellement l'état électrique de l'intérieur du tube, ni l'effet que produit cet état électrique sur les conducteurs extérieurs au tube.

Nous avons vu aussi que cette indépendance implique que l'électricité quitte l'électrode d'où elle part en vertu de la tension électrique à cette électrode et, seulement à un degré bien moindre, en vertu de l'action corrélatrice de l'autre électrode. De crainte que ces conclusions ne paraissent prématurées, les auteurs décrivent une classe de phénomènes qui fournit un témoignage important en faveur de leurs idées.

Prenons deux tubes raréfiés de même forme générale; relierons une électrode de chacun à l'un des pôles d'une grande machine de Holtz, et l'autre électrode à l'autre pôle, en intercalant une étincelle (dans le circuit positif, par exemple) de façon que l'électricité ait deux chemins à choisir à travers l'un ou à travers l'autre des tubes, l'étincelle étant commune aux deux chemins : on observe alors un phénomène bien remarquable (fig. 230). Si l'étincelle

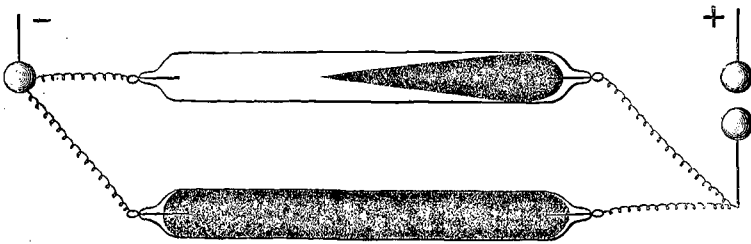


FIG. 230.

est de grandeur convenable, on trouve que l'un des tubes est entièrement traversé par la décharge, tandis que l'autre est occupé seulement par une colonne lumineuse partant de l'électrode positive et s'étendant sur une partie considérable du tube en s'amincissant en pointe. Si l'étincelle ne dépasse pas certaines limites dépendant de la « résistance » des deux tubes, il n'y a pas de luminosité à

l'autre bout du tubé, et il ne se produit pas de décharge dans ce bout. On n'observe aucun effet sur la colonne lumineuse ni sur aucune partie de la décharge, si on coupe la communication avec l'électrode la plus éloignée; on voit donc, ce que l'aspect de la colonne révèle suffisamment, que la décharge est unipolaire ou incomplète. On observe quelquefois au bout de cette colonne finissant en pointe des traces légères de nébulosité bleue : elles sont dues probablement à un peu d'électricité négative recueillie dans le voisinage, mais nullement à une décharge directe de l'autre électrode. *En fait, la décharge pénètre bien dans le tube; mais, n'ayant pas assez de force pour le traverser, elle revient par le chemin par lequel elle était entrée.* On examinera plus tard la cause de ce retour; il suffira, pour le moment, de faire remarquer qu'on a là une décharge partant d'un pôle avec trop peu de force pour arriver près de l'autre et s'y détendre, en sorte qu'elle préfère revenir par le chemin par lequel elle était venue, plutôt que de traverser le tube jusqu'à l'autre électrode. Les auteurs proposent d'appeler de pareilles décharges des *décharges unipolaires*.

Il est clair que la décharge unipolaire est intermittente et, par suite, sensitive. Si nous prenons une tige de verre (fig. 231) à l'extrémité de laquelle est un morceau de feuille d'étain en communication électrique avec l'électrode positive du tube, et si nous la tenons près du bout de la colonne lumineuse et un peu au delà, nous trouverons que cette colonne est ramenée en arrière; et si nous la rapprochons avec précaution du pôle positif, nous réussirons souvent à ramener la colonne lumineuse tout à fait en arrière et à empêcher toute décharge visible de se produire dans le tube. L'explication de ce fait est évidente.

Au moment où se produit à l'électrode positive la charge qui donne lieu à la décharge, il se produit aussi, sur la feuille d'étain, une charge qui, par son action inductive, tend à empêcher le mouvement en avant de toute électricité positive libre. Ainsi, quelque rapide que soit le mouvement pulsatoire, la force qui tend à empêcher la dé-

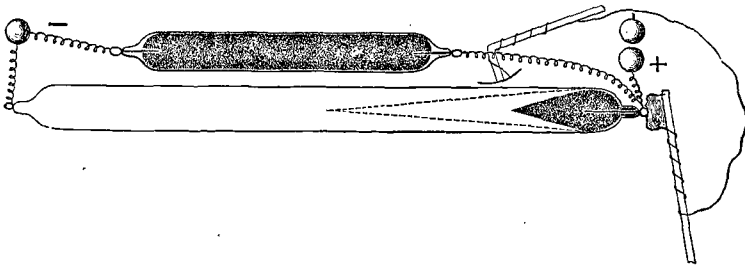


FIG. 231.

charge reste en concordance exacte avec lui et fait rétrograder la colonne lumineuse. Si on met à la terre le fil et la feuille d'étain, ou qu'on emploie quelque autre système de détente, on observe que les effets habituels de mise à la terre se produisent dans les décharges unipolaires.

Une forme de ces expériences, peut-être plus frappante encore, consiste à employer un tube avec une électrode intermédiaire (fig. 232); on relie cette électrode et l'une des électrodes extrêmes au pôle positif de la machine, l'autre électrode extrême du tube au pôle négatif de la machine. Intercalons une étincelle dans le circuit positif, de façon qu'elle fasse partie du chemin qui va aux deux électrodes reliées au pôle positif de la machine. Si l'étincelle a des dimensions convenables, on trouve que tout le courant proprement dit passe de l'électrode positive du milieu à

l'électrode négative et qu'en outre une colonne lumineuse allongée en pointe part de l'électrode positive extrême vers l'électrode du milieu et que de celle-ci part

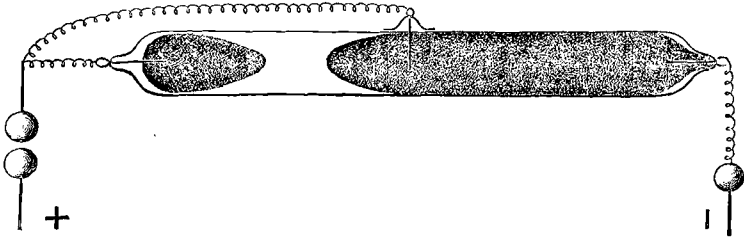


FIG. 232.

une seconde colonne lumineuse allongée en pointe comme la précédente et allant à sa rencontre (fig. 232). Ou bien encore, si l'on dispose deux tubes comme dans l'expé-

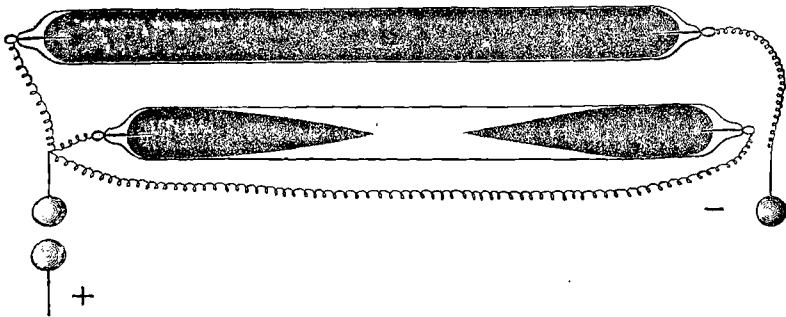


FIG. 233.

rience qui précède celle qui vient d'être décrite et que l'on relie les deux électrodes du second tube au pôle positif de la machine (fig. 233), on a, comme plus haut, deux colonnes positives unipolaires. Ces deux décharges ne se rejoignent pas, et il est clair que nous devons obtenir naturellement le même effet que celui obtenu auparavant au

moyen de la feuille d'étain. Chacune de ces décharges agit par répulsion sur l'autre et la repousse en arrière. Si on emploie la feuille d'étain, comme dans l'expérience antérieure (fig. 232), on peut ramener successivement chacune des colonnes en arrière, quelquefois jusqu'à son électrode, et, entre des limites étendues, à mesure qu'une colonne recule, l'autre avance, et *inversement*.

L'expérience avec l'électrode intermédiaire montre très nettement que la décharge, à partir de l'électrode reliée à l'étincelle, ne dépend que des forces en jeu à cette électrode et ne dépend guère de l'état de l'autre électrode du tube. On voit que l'électricité positive qui sort de l'électrode du milieu s'écoule en abondance dans une direction où, non seulement il n'y a pas d'électrode négative, mais encore où se trouve dans le cas actuel une électrode positive qui réussit finalement à arrêter son mouvement en avant.

À l'appui de cette assertion que ces colonnes lumineuses en forme de languette sont des parties de deux décharges incomplètes distinctes, on peut encore ajouter que les indications des aimants montrent que ces colonnes représentent des décharges marchant dans des directions opposées, l'électricité positive allant dans chaque décharge de la base de chaque colonne vers son sommet.

Des phénomènes semblables, sauf en ce qui concerne la forme de la colonne lumineuse, se manifestent lorsqu'on relie les deux électrodes au pôle négatif de la machine.

Au cours de leurs expériences, les auteurs ont montré que si on produit une décharge de faible quantité au moyen d'une bobine de construction symétrique, l'électricité passe dans le tube simultanément par les deux élec-

trodes, et les deux décharges se rencontrent et forment une zone neutre près du milieu du tube.

Si on relie un petit condensateur à l'une des électrodes du tube, lorsqu'on emploie la décharge d'une bobine, l'effet produit est de diminuer la tension électrique à cette électrode et de déplacer la zone neutre. Il est très instructif de comparer ces effets avec les effets analogues observés dans le cas des décharges unipolaires. Si on réunit l'électrode proprement dite d'un tube où se produit une décharge unipolaire à un petit condensateur formé, par exemple, de deux feuilles d'étain de 20 centimètres carrés, séparées par une feuille de mica, on voit la languette lumineuse se raccourcir un peu. Si maintenant on met à la terre l'autre armature du condensateur, on voit la colonne se raccourcir encore et quelquefois disparaître presque en entier. Si on relie l'électrode à un grand condensateur ou à une bouteille de Leyde, la décharge disparaît entièrement. Ainsi, nous voyons que, de même que dans le cas des décharges d'une bobine d'induction, un condensateur ou une bouteille de Leyde a pour effet d'étouffer ou d'affaiblir l'intensité des changements de tension électrique qui se produisent par impulsions aux électrodes du tube, et par conséquent de diminuer la violence des décharges dans le tube.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les auteurs tirent de ces expériences la conclusion suivante : les décharges aux deux électrodes sont dans une indépendance si complète que l'on peut faire à volonté que les décharges aux deux électrodes soient d'intensités égales et de signes opposés (comme dans le cas de la bobine d'induction), ou qu'elles soient inégales et dans un rapport quelconque (cas de la bobine avec un petit condensateur).

On peut encore produire la décharge à une électrode seulement, l'autre électrode n'agissant que pour recevoir (cas de la décharge avec étincelle dans l'air); ou bien on peut faire que la décharge parte d'une seule électrode et retourne à la même électrode, l'autre électrode n'ayant aucune part dans la décharge; ou enfin on peut faire jaillir des deux électrodes deux décharges de même signe, indépendantes, revenant chacune à l'électrode d'où elle est partie.

Le mémoire se termine par l'examen de

L'ÉTAT DU TUBE PENDANT QUE SE PRODUIT LA DÉCHARGE

Les auteurs ont trouvé que la décharge *ne se produit pas simultanément* sur toute la longueur du tube, mais qu'elle est progressive et part de l'électrode où éclate l'étincelle.

Si deux morceaux de feuille d'étain, reliés par un fil fin, sont placés sur le tube, un petit morceau A près de l'électrode où éclate l'étincelle, et un grand morceau B près de l'électrode opposée, on trouve que la détente en A est aussi complète que si B (toujours attaché au fil) était tout à fait éloigné du tube.

Ce qui montre qu'au moment où l'effet de détente se fait sentir en A, il n'existe pas encore en B, c'est-à-dire que la décharge n'a pas encore atteint B au moment où elle passe en A.

REMARQUES FINALES

Les auteurs examinent ensuite si les résultats qu'ils ont établis pour les décharges discontinuées sont aussi vrais pour les décharges continues; leur conclusion est que les éléments essentiels de la décharge électrique à travers les gaz raréfiés sont les mêmes, que la décharge soit inter-

rompue, ininterrompue, ou entièrement discontinue, et peut-être alternative.

Or, l'explication la plus simple de ce résultat, la seule même qui se présente, est que le caractère reconnu comme fondamental pour les décharges sensibles, le caractère de décharges disruptives, est commun aux deux sortes de décharge, et que c'est dans le degré auquel les deux sortes de décharge présentent ce caractère qu'il faut chercher la différence qui existe entre elles (1).

Dans les deux décharges, chaque électrode émet de l'électricité pour satisfaire ses besoins propres et, à un bien moindre degré seulement, pour satisfaire les besoins de l'électrode opposée. Une électrode n'est pas affectée directement par l'état électrique de l'autre, comme cela arriverait si elles étaient en communication métallique ; elle émet sa propre électricité à l'état de liberté, et la laisse se diriger à sa guise dans cet état. Si ces deux propositions pouvaient être établies d'une façon concluante, on aurait fait un grand progrès dans la connaissance de la nature des décharges électriques ; et, quoique les auteurs estiment que ce progrès n'est pas réalisé pour le moment, ils ont la confiance que les résultats énoncés dans leur mémoire contribueront beaucoup à justifier ces deux propositions.

Les auteurs terminent en énumérant un certain nombre d'arguments à l'appui de cette hypothèse que toutes les décharges sont discontinues. Si l'on considère en particulier que les stries sont *formées* par la décharge, la probabilité que les deux espèces de décharges sont pulsatoires deviendra

(1) Il faut remarquer que, dans la décharge ordinaire, les pulsations discontinues par lesquelles l'électricité quitte les électrodes doivent être très petites.

encore plus grande. Cette remarque permet difficilement de supposer qu'un courant véritablement continu puisse imiter les effets que nous connaissons et qui sont produits par des décharges certainement instantanées et interrompues. Si l'on regarde comme suffisante l'explication que donne le mémoire de la forme d'une décharge qui passe d'une strie à une autre (vol. II, p. 220), ces remarques auront encore plus de poids; car on a peine à concevoir qu'un courant véritablement continu puisse suivre une marche aussi bizarre. Le passage d'une strie à une autre strie doit alors être regardé comme une décharge disruptive et discontinue; et, si ce point est établi, comme les stries ne sont que des cas particuliers des électrodes, il en résulte d'une façon presque évidente que toutes les décharges dans l'air raréfié sont également disruptives et discontinues.

CHAPITRE XXXVII

PHÉNOMÈNES DANS LES VIDES POUSSÉS TRÈS LOIN EXPÉRIENCES DE CROOKES (1)

M. Crookes a découvert que, lorsque la raréfaction dans un tube à vide est poussée bien au-delà du degré où les stries et les effets lumineux se produisent le mieux, il se manifeste une nouvelle série de phénomènes qui n'avaient pas été observés jusqu'ici : le résidu gazeux se montre doué de tant de propriétés nouvelles que l'auteur croit pouvoir dire que le gaz, à ces basses pressions, peut être regardé comme une matière qui serait dans un quatrième état ou état ultra-gazeux. Il donne à cette matière le nom de « matière radiante ».

Suivant M. Crookes, il y aurait quatre états de la matière, savoir :

(1) Solide, (2) Liquide, (3) Gazeux, (4) Radiant.

Pour justifier cette manière de voir, que tous les physiiciens sont loin d'admettre (2), M. Crookes s'appuie sur ce que les différences entre le 3^e et le 4^e état paraissent au moins aussi grandes que celles entre le 2^e et le 3^e et sont certainement plus grandes qu'entre le 1^{er} et le 2^e.

La pression à laquelle les nouveaux phénomènes se

(1) *On Radiant Matter*, conférence faite à l'Association Britannique, à Sheffield, le 22 août 1879, par Wm. Crookes, F. R. S.

(2) Voir l'appendice suivant.

manifestent le mieux est d'environ 1 M (un millionième d'atmosphère).

La différence entre un gaz à 1 M et ce gaz à 3 000 M, par exemple, semble due principalement à ce fait qu'à la plus basse de ces pressions le « libre parcours » de chaque molécule, c'est-à-dire la distance moyenne qu'elle peut parcourir sans entrer en collision avec une autre molécule, est comparativement long, tandis qu'à plus haute pression, il est beaucoup plus court.

Quand il s'agit d'un gaz à haute pression, on ne peut guère admettre que les molécules se meuvent en ligne droite, car la direction de leur mouvement est continuellement changée par le choc. Comme approximation grossière, on peut dire que, à la pression de 1 M, la « moyenne de libre parcours », c'est-à-dire la distance moyenne que chaque molécule peut parcourir en ligne droite avant d'être déviée par une collision, est environ 3 000 fois plus longue que la moyenne de libre parcours dans un gaz à la pression de 3 000 M, pression ordinaire des tubes à vide. En fait, comme l'observe M. Crookes, « quand la raréfaction est poussée très loin, la distance moyenne de libre parcours devient si longue que le nombre de fois où la molécule entre en collision devient négligeable par rapport au nombre de fois où ces collisions n'ont pas lieu, et qu'en moyenne on peut considérer la molécule comme obéissant à ses mouvements propres ou à ses lois, sans interférence. La moyenne de libre parcours est en réalité comparable aux dimensions du récipient, et nous n'avons plus affaire à une portion *continue* de matière, comme c'était le cas avec des tubes où le vide était moins parfait, mais bien aux molécules *individuellement* ».

L'ESPACE OBSCUR AU PÔLE NÉGATIF

Dans tous les tubes où le vide est poussé loin, un petit « espace obscur » environne le pôle négatif.

M. Crookes constate que cet espace obscur augmente lorsque le vide devient plus parfait. Il donne de cet accroissement l'explication suivante :

Les molécules de gaz s'élancent du pôle négatif et, tant qu'elles n'entrent pas en collision avec d'autres molécules, elles ne produisent pas de lumière. L'espace qu'elles parcourent sans collision reste obscur.

Lorsque la moyenne de libre parcours augmente par la diminution de la pression, l'espace obscur grandit.

L'expérience suivante a été imaginée pour faire voir cet « espace obscur » à tout un auditoire :

Le tube (fig. 234) contient un disque métallique disposé

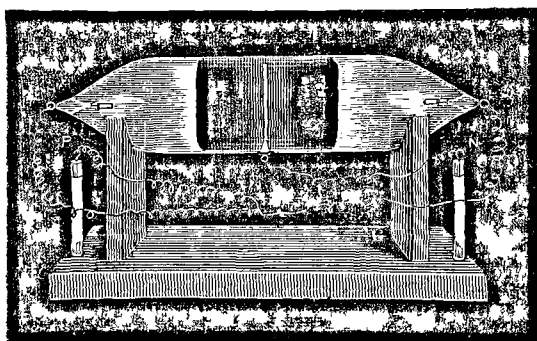


Fig. 234.

au milieu de sa longueur, de manière à servir d'électrode ; en outre, une autre électrode se trouve à chaque extrémité. On fait de l'électrode du milieu un pôle négatif, et on relie ensemble les deux électrodes extrêmes, pour en faire des

pôles positifs. L'espace obscur occupera alors le milieu du tube. Lorsque le degré de vide n'est pas très grand, cet espace s'étend très peu de part et d'autre du pôle négatif central. Mais quand le vide est poussé très loin, comme dans le tube montré aux assistants, et qu'on fait passer le courant de la bobine d'induction, l'espace obscur s'étend d'environ 25 millimètres (1) de chaque côté du pôle.

LA MATIÈRE RADIANTE EXERCE UNE ACTION PHOSPHORESCENTE
ÉNERGIQUE PARTOUT OÙ ELLE FRAPPE

Nous avons dit que la matière radiante, dans l'espace obscur, détermine une production de lumière lorsque son mouvement rapide est arrêté par le résidu de gaz qui se trouve en dehors de cet espace. Mais, s'il n'y a aucun résidu de gaz, les molécules ne seront arrêtées dans leurs parcours que par les parois du tube; et ici nous arrivons à la première et à la fois à l'une des plus remarquables propriétés de la matière radiante, émise du pôle négatif: son pouvoir de produire de la phosphorescence lorsqu'elle vient frapper de la matière solide. Le nombre des corps qui deviennent lumineux par l'effet de ce bombardement moléculaire est très grand, et les couleurs qui en résultent sont très variées. Le verre, par exemple, devient très phosphorescent quand il est exposé à un courant de matière radiante. La figure 235 représente trois tubes à boules de verres différents: le tube (a) en verre d'urane donne une phosphorescence de couleur vert foncé; le tube (b) en verre anglais donne une phosphorescence bleue; et le troisième tube (c) en verre d'Allemagne fusible, avec lequel sont fabriqués la plupart des appareils dont on s'est servi dans la

(1) La moyenne de libre parcours des molécules était donc dans ce cas de 25 millims. environ.

conférence, donne une phosphorescence brillante de couleur vert-pomme.

Beaucoup d'autres substances sont également phosphorescentes sous l'influence de la matière radiante.

Le sulfure de calcium lumineux, préparé d'après la méthode de M. Ed. Becquerel, exposé simplement à la lumière d'une bougie, reste phosphorescent pendant plusieurs heures avec une couleur blanc-bleuâtre. Mais cette phosphorescence est beaucoup plus intense sous l'influence d'une décharge lumineuse dans le vide.

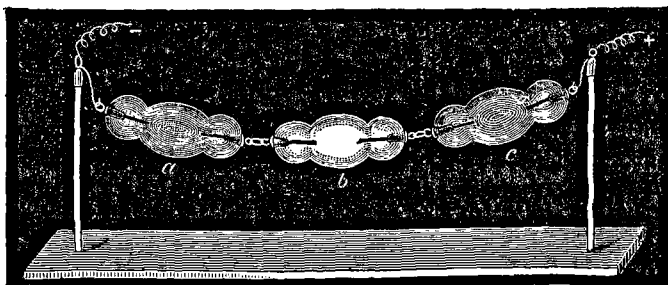


FIG. 235.

La phénakite (aluminat de glucine), minéral très rare, a une phosphorescence bleue ; le spadumène (silicat d'alumine et de lithine), autre minéral, a une phosphorescence d'un jaune d'or magnifique ; l'émeraude émet une lumière cramoisie. Mais de toutes les substances sans exception, le diamant est, d'après M. Crookes, celle qui donne la phosphorescence la plus rapide et la plus brillante. Dans sa conférence, M. Crookes a présenté un diamant fluorescent fort curieux, qui est vert à la lumière du jour et incolore à la lumière d'une bougie. Il est monté au centre d'un ballon (fig. 236) dans lequel on a fait le vide, et est soumis à

d'action d'un courant moléculaire dirigé de bas en haut. En faisant l'obscurité dans la salle, on voyait ce diamant

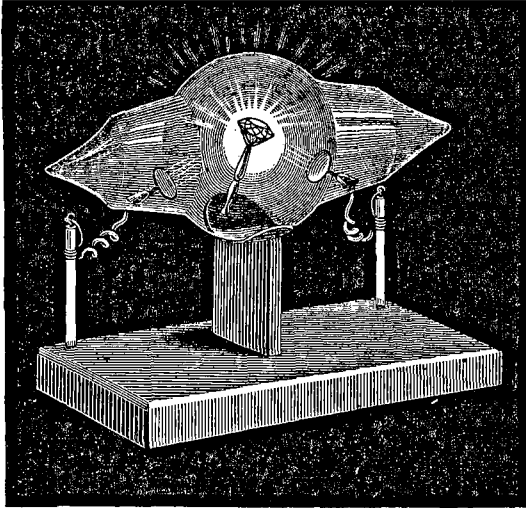


FIG. 236.

briller avec plus d'éclat qu'une bougie, et émettre une phosphorescence d'un vert clair.
Après le diamant, le rubis est une des pierres les plus remarquables pour la phosphorescence. Le tube représenté dans la figure 237 contenait une jolie collection de rubis sous forme de cailloux. Dès qu'on y fait passer l'étincelle d'induction, on voit ces rubis émettre une brillante lumière d'un ton rouge magnifique, comme s'ils étaient incandescents. La nuance de la pierre dans cette expérience n'a pas d'importance. Dans les rubis naturels que contenait le tube se trouvaient des pierres de toutes les nuances, depuis le rubis rouge foncé jusqu'au rubis rose pâle. Quelques-unes de ces pierres étaient presque incolores, d'autres avaient

la teinte sang de pigeon, qui est si recherchée; mais sous le choc de la matière radiante elles émettaient toutes une lumière phosphorescente de la même couleur.

Or, le rubis n'est autre chose que de l'alumine cristallisée avec un peu de matière colorante. Dans un mémoire (1) publié depuis vingt ans, M. Ed. Becquerel décrit l'alumine comme donnant une belle couleur rouge au phosphroscope. M. Crookes montrait un autre tube dans lequel se

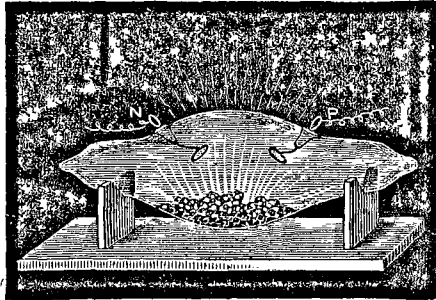


FIG. 237.

trouvait de l'alumine précipitée, qui avait été préparée avec le plus grand soin. Chauffée au blanc, et sous l'influence de la décharge moléculaire, elle brillait aussi avec la même belle couleur rouge (2).

La figure 238 représente un tube destiné à mettre en évidence la relation qui existe entre la phosphorescence du

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, vol. LVII, p. 50, 1859.

(2) Le spectre de la lumière rouge émise par ces variétés d'alumine est le même que celui décrit par M. Becquerel, il y a vingt ans. Il présente une raie d'un rouge intense, un peu au-dessous de la raie fixe B du spectre, avec une longueur d'onde d'environ 6895. Il y a un spectre continu qui commence vers B, avec quelques raies plus faibles au delà, mais elles sont si pâles en comparaison de cette raie rouge que l'on peut les négliger. On distingue aisément cette raie en examinant avec un petit spectroscopie de poche la lumière que réfléchit un bon rubis.

verre et le degré de raréfaction. Les deux pôles sont situés en *a* et *b*, et au bout (*c*) se trouve un petit tube supplémentaire qui communique avec l'autre tube par un orifice étroit et contient de la potasse caustique solide. On a fait dans le tube le vide presque parfait et la potasse a été chauffée de façon à faire dégager la vapeur d'eau qu'elle contenait, et à altérer ainsi le vide. On a recommencé à faire le vide, et à plusieurs reprises on a chauffé la potasse, et fait le vide jusqu'à amener le tube à l'état où on le présentait. Quand on faisait passer l'étincelle d'induction, on ne voyait rien : le vide était si parfait que le tube ne con-

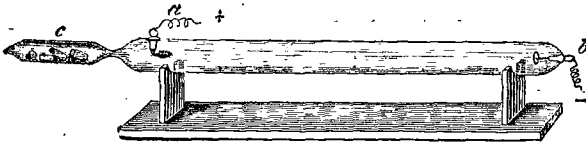


FIG. 238.

duisait plus. On chauffait alors légèrement la potasse avec une lampe, de façon à mettre en liberté une trace de vapeur d'eau. Aussitôt, le tube commençait à être conducteur et une phosphorescence verte brillait sur toute sa longueur. On continuait à chauffer, de manière à dégager de la potasse un peu plus de vapeur d'eau. Le vert pâlisait, puis une nuée lumineuse envahissait le tube ; on voyait apparaître des stratifications, qui devenaient bientôt de plus en plus étroites, jusqu'à ce qu'enfin une étincelle traversât le tube sous la forme d'une mince raie pourpre. On retirait alors la lampe, et on laissait refroidir la potasse ; celle-ci, en se refroidissant, réabsorbait la vapeur d'eau que la chaleur avait fait dégager. La raie pourpre s'élargissait et se brisait en fines stratifications ; celles-ci s'élargissaient à leur

tour et se dirigeaient vers le tube à potasse. Une onde de lumière verte apparaissait ensuite sur le verre à l'autre extrémité du tube, se propageait et chassait sur la potasse la dernière stratification pâle; enfin, le tube se couvrait sur toute sa longueur d'une phosphorescence verte. En abandonnant le tube à lui-même pendant un certain temps, cette phosphorescence verte devenait plus faible et le vide cessait d'être conducteur.

LA MATIÈRE RADIANTE SE MEUT EN LIGNE DROITE

La matière radiante, dont le choc sur le verre produit un dégagement de lumière, est absolument incapable de s'écarter elle-même de la ligne droite. La figure 239 repré-

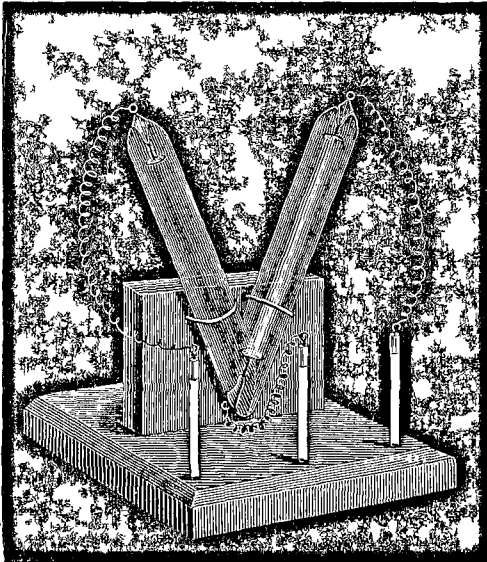


FIG. 239.

sente un tube en forme de V, muni d'une électrode à chaque

extrémité. L'électrode du côté droit (α) étant négative, toute la branche de droite du tube est inondée de lumière verte ; mais, à l'extrémité inférieure, cette lumière s'arrête brusquement et se refuse à contourner l'angle pour pénétrer dans la branche de gauche. Si l'on renverse le sens du courant, et qu'on rende négatif le pôle de gauche, la lumière verte passe à gauche, suivant toujours le pôle négatif et laissant le côté positif dans une obscurité presque complète.

Dans les expériences ordinaires que l'on fait avec les tubes à vide, on a l'habitude, pour mieux faire ressortir les contrastes de couleur, de donner aux tubes des courbures très compliquées. La lueur due à la phosphorescence du gaz rémanent suit toutes les circonvolutions que d'habiles souffleurs de verre parviennent à donner aux tubes. Le pôle négatif étant à une extrémité et le pôle positif à l'autre, les phénomènes lumineux semblent dépendre plus du pôle positif que du pôle négatif, au degré ordinaire de raréfaction jusqu'ici en usage pour mettre le mieux en évidence les phénomènes des tubes à vide. Mais si le vide est poussé beaucoup plus loin, les phénomènes que présentent les tubes à vide ordinaires traversés par l'étincelle d'induction, nuage lumineux et stratification, disparaissent entièrement. On ne voit dans l'intérieur du tube ni nuage ni brouillard, et la seule lumière observée est celle qui vient de la surface phosphorescente du verre. La figure 240 représente deux boules, de même forme et avec des pôles semblablement disposés : la seule différence est que dans l'une d'elles (A) le vide a été poussé seulement à quelques millimètres de mercure, vide modéré qui donne les phénomènes lumineux ordinaires, tandis que dans l'autre (B) le vide a été porté à un millionième d'atmo-

sphère environ. La boule (A) est d'abord mise en communication avec la bobine d'induction et, faisant toujours négatif le pôle (a) sur l'un des côtés, on attache le fil positif successivement à chacun des autres pôles dont la boule est munie. Quand on change la position du pôle positif, la

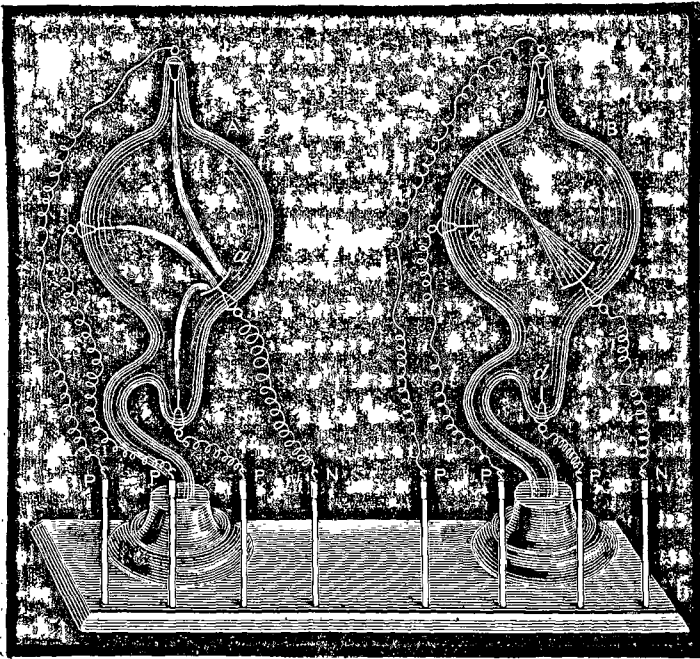


FIG. 210.

ligne de lumière violette qui joint les deux pôles change aussi, le courant électrique choisissant toujours le chemin le plus court entre les deux pôles et se déplaçant dans la boule quand on déplace le pôle positif.

Tel est le genre de phénomène que l'on obtient au degré ordinaire de raréfaction. On répète la même expérience

avec la boule B, dans laquelle le vide est presque parfait, le pôle (α') sur le côté est encore fait négatif, et le pôle (b) du sommet positif. L'aspect que présente cette boule est alors très différent de celui de la précédente. Le pôle négatif a la forme d'une coupelle peu profonde. Les rayons moléculaires qui en partent se croisent au centre de la boule, vont tomber en divergeant sur la paroi opposée et y produisent une plaque circulaire de lumière phosphorescente verte. On détache le fil positif du pôle situé au sommet et on le relie au pôle (c) situé sur le côté, puis au pôle (d) situé au bas; mais la plaque verte reste où elle était tout d'abord et ne change ni de position ni d'intensité.

Ce fait nous montre une autre propriété de la matière radiante. Avec un faible degré de raréfaction, la position du pôle positif a une grande importance, tandis qu'avec un vide presque parfait, la position de ce même pôle n'en a presque aucune; les phénomènes semblent dépendre entièrement du pôle négatif. Si le pôle négatif est tourné dans la direction du pôle positif, rien de mieux; mais si le pôle négatif est dirigé dans le sens absolument opposé, cela importe peu: la matière radiante s'élançe, malgré tout, du pôle négatif en droite ligne.

Si, au lieu d'un disque plat, on prend pour pôle négatif une surface demi-cylindrique, la matière rayonne encore normalement à cette surface. Le tube que représente la figure 241 permet de constater cette propriété. Il contient, comme pôle négatif, un demi-cylindre (a) d'aluminium poli, relié par un fil de cuivre fin (b) à l'électrode de platine (c). A la partie supérieure du tube se trouve une autre électrode (d). La communication avec la bobine d'induction est établie de telle sorte que le demi-cylindre est négatif et le pôle supérieur positif; et, quand le vide a été poussé

suffisamment loin, la concentration des rayons molé-

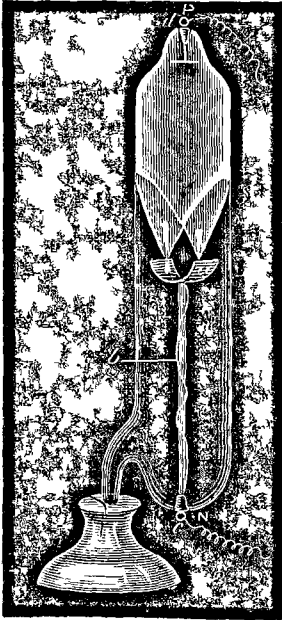


Fig. 241

laires en un foyer unique offre un très bel aspect. Les rayons de matière, étant lancés de la surface cylindrique dans des directions normales à cette surface, convergent en une ligne focale, puis divergent, marquant leur trace par une brillante phosphorescence verte sur la surface du verre.

Dans un autre tube, on recevait le foyer des rayons moléculaires sur un écran phosphorescent à la place du verre.

L'effet produit était plus brillant et la lumière obtenue éclairait toute la table.

LA MATIÈRE RADIANTE INTERCEPTÉE PAR UNE MATIÈRE SOLIDE PROJETTE UNE OMBRE

La matière radiante part du pôle en suivant des lignes droites, et ne se répand pas simplement dans toutes les parties du tube en le remplissant de lumière, comme cela arriverait si le vide était moins parfait. Quand ils ne rencontrent aucun obstacle sur leur route, les rayons vont frapper l'écran, sur lequel ils déterminent une phosphorescence; et quand une matière solide se trouve sur leur passage, ils sont arrêtés et une ombre se projette sur l'écran.

Dans le tube en forme de poire de la figure 242, le pôle négatif (*a*) est situé à l'extrémité pointue. Vers le milieu se trouve une croix (*b*) découpée dans une feuille d'aluminium et placée de façon à intercepter une partie des rayons venant du pôle négatif : l'image de cette croix est alors projetée sur l'extrémité hémisphérique du tube, laquelle est phosphorescente. Lorsque le courant de la bobine d'induction traverse le tube, on voit clairement l'ombre noire de la croix se détacher sur le fond lumineux du tube (*c d*). La matière radiante venant du pôle négatif a passé à côté de la croix d'aluminium pour produire cette ombre ; le

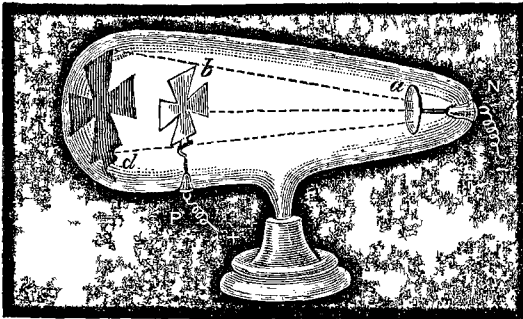


FIG. 242.

verre a été frappé et bombardé au point de s'échauffer, d'une manière appréciable et a en même temps subi un autre effet : sa sensibilité a été amortie. Le verre a été fatigué, si l'on peut employer cette expression, par la phosphorescence qui lui a été imposée. Le bombardement moléculaire a déterminé un changement qui empêchera le verre de répondre aisément à une nouvelle excitation ; mais la partie du verre que l'ombre recouvrait n'est point fatiguée ; elle n'a pas eu de phosphorescence et est encore toute fraîche ; par conséquent, si l'on fait tomber cette

croix (1), de façon à laisser les rayons partis du pôle négatif arriver sur l'extrémité du tube, sans être interceptés, on voit la croix noire (*cd*, fig. 243) se changer brusquement en une croix lumineuse (*ef*), parce que la surface du fond du tube ne peut plus donner qu'une faible phosphorescence, tandis que la partie qui était recouverte par l'ombre noire a conservé tout son pouvoir phosphorescent.

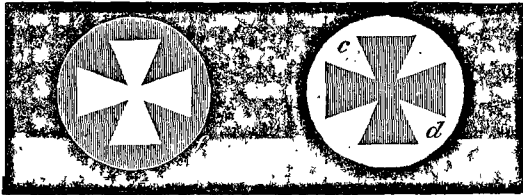


FIG. 243.

L'image de la croix lumineuse ne tarde pas à s'effacer. Après un certain temps de repos, le verre recouvre en partie sa propriété de phosphorescence, mais il ne redevient jamais aussi sensible qu'au début.

Voilà donc encore une importante propriété de la matière radiante. Elle est lancée avec une grande vitesse du pôle négatif, et non seulement elle frappe le verre de manière à le faire vibrer et à le rendre temporairement lumineux pendant la décharge, mais encore les coups portés par les molécules sont assez énergiques pour laisser sur le verre une impression durable.

(1) Il suffit, pour faire tomber la croix, de donner à l'appareil une légère secousse, M. Gimmingham ayant construit cette croix d'une façon fort ingénieuse en y adaptant une charnière.

LA MATIÈRE RADIANTE EXERCE UNE ACTION MÉCANIQUE
ÉNERGIQUE SUR LES CORPS QU'ELLE FRAPPE

La netteté des ombres moléculaires nous a fait voir que la matière radiante est arrêtée par tout corps solide qui se trouve sur son passage. Si ce corps solide est facile à mettre en mouvement, le choc des molécules se manifestera par une action mécanique énergique. La figure 244 représente un appareil d'un mécanisme ingénieux, construit par M. Gimingham, qui, placé dans la lanterne électrique,

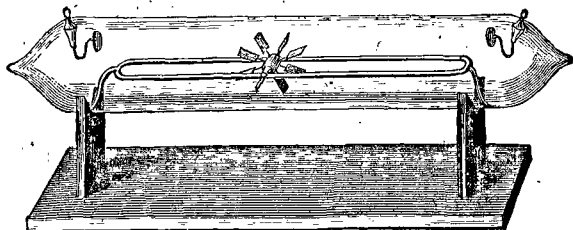


Fig. 244.

rend cette action mécanique clairement visible. Il consiste en un tube de verre où le vide a été poussé très loin, contenant une sorte de petit chemin de fer à rails de verre s'étendant d'un bout à l'autre du tube. L'axe d'une petite roue à larges palettes de mica tourne sur les rails. A chaque extrémité du tube, et un peu au-dessus du centre, se trouve une électrode d'aluminium. Lorsque l'une ou l'autre est rendue négative, un courant de matière radiante s'élanche de ce pôle le long du tube, et, frappant les palettes supérieures de la petite roue, la fait tourner et avancer le long des rails. En renversant les pôles, on peut arrêter la roue et la faire marcher en sens contraire; et si l'on incline doucement le tube, le choc est assez puissant pour forcer la roue à remonter le tube.

Cette expérience démontre donc que le courant moléculaire qui part du pôle négatif peut mettre en mouvement tout obstacle léger qu'il rencontre sur sa route.

Les molécules étant lancées du pôle avec violence, celui-ci doit éprouver un recul, et avec un appareil disposé de telle sorte que le pôle négatif soit mobile et que le corps qui reçoit le choc de la matière radiante soit fixe, ce recul pourra être rendu sensible. La figure 245 représente un appareil qui ressemble à un radiomètre ordinaire, qui aurait pour palettes des disques d'aluminium revêtus sur uné de leurs faces d'une pellicule de mica. La chape sur laquelle porte l'arbre des palettes est en acier dur au lieu d'être en verre, et la pointe sur laquelle il pivote est reliée par un fil métallique avec une électrode de platine scellée dans le verre. Au sommet de la boule du radiomètre est scellée une seconde électrode. Le radiomètre peut donc être relié à une bobine d'induction, de manière que l'arbre mobile devienne le pôle négatif.

Pour obtenir ces effets mécaniques, il n'est pas nécessaire de produire un vide aussi parfait que lorsqu'il s'agit d'obtenir la phosphorescence. La pression la plus convenable pour ce radiomètre électrique est un peu supérieure à celle à laquelle l'espace sombre qui entoure le pôle négatif s'étend jusqu'aux parois de la boule de verre. Lorsque la pression n'est plus que de quelques millimètres de mercure, le courant d'induction forme sur la face métallique des disques un halo de lumière violette veloutée, tandis que la face de mica reste obscure. A mesure que la pression diminue, on voit un espace sombre séparer le halo violet du métal. A la pression d'un demi-millimètre, cet espace sombre s'étend jusqu'au verre, et la rotation commence. En continuant à faire le vide, l'espace sombre s'élargit

encore et semble s'aplatir contre le verre, et la rotation devient alors très rapide.

La figure 246 représente un autre appareil, qui met en évidence la force mécanique de la matière radiante lancée

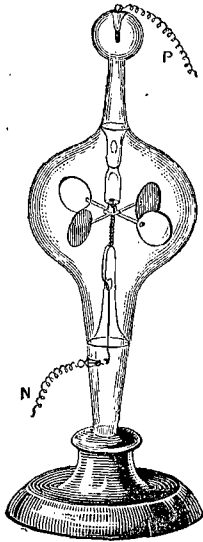


FIG. 245.

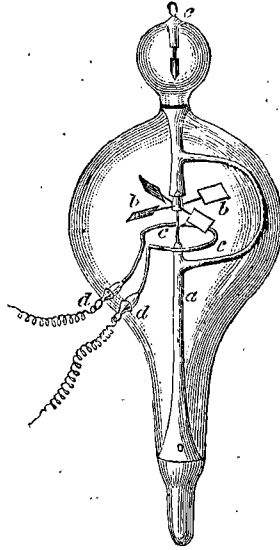


FIG. 246.

du pôle négatif. Une tige (*a*) porte une pointe d'aiguille sur laquelle peut tourner un léger volant à palettes de mica (*bb*). Ce volant se compose de quatre palettes carrées de mica mince et transparent, supportées par de légers bras d'aluminium, qui ont pour centre une petite chape de verre qui repose sur la pointe d'aiguille. Les palettes sont inclinées de 45 degrés sur le plan horizontal. Au-dessous de ce volant se trouve un anneau de fil de platine fin (*cc*), dont les extrémités traversent en *dd* le verre de l'instrument. Une électrode d'aluminium (*e*) est scellée au haut du tubé, dans lequel le vide est poussé très loin.

Au moyen de la lanterne électrique, on projette sur l'écran une image des palettes. On attache les fils de la bobine d'induction, de manière que l'anneau de platine soit le pôle négatif, le fil d'aluminium (*e*) étant positif. Aussitôt, par l'effet de la matière radiante projetée de l'anneau de platine, les palettes tourneront avec une rapidité extrême. Jusqu'ici cet appareil ne montre rien que les expériences précédentes ne permettent de prévoir; mais il sert à faire voir un autre phénomène. On interrompt les communications avec la bobine d'induction et on attache les deux bouts de fil de platine aux pôles d'une petite pile galvanique: l'anneau *cc* chauffe au rouge, et sous son influence on voit le volant tourner aussi vite que sous l'action de la bobine d'induction.

Voilà donc un autre fait très important. Dans un vide presque parfait, la matière radiante est non seulement excitée par le pôle négatif d'une bobine d'induction, mais un fil porté au rouge pourra la mettre en mouvement avec une force suffisante pour faire tourner les palettes inclinées.

LA MATIÈRE RADIANTE EST DÉVIÉE PAR UN AIMANT

Passons à une propriété de la matière radiante. Dans le long tube de verre de la figure 247, le vide a été poussé

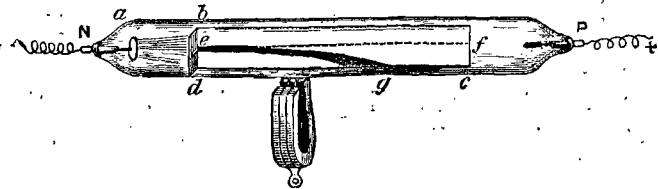


FIG. 247.

très loin; il a un pôle négatif à une de ses extrémités (*a*) et

un écran phosphorescent (*bc*) s'étend sur une grande partie de sa longueur. En face du pôle négatif est une plaque de mica (*bd*) percée d'un trou; et lorsqu'on fait passer le courant, une ligne de lumière phosphorescente (*ef*) se projette sur toute la longueur du tube. On place alors sous le tube un aimant puissant en fer à cheval, et la ligne de lumière se courbe suivant *eg* sous l'influence magnétique, et ondule comme une baguette flexible, quand on fait varier la position de l'aimant.)

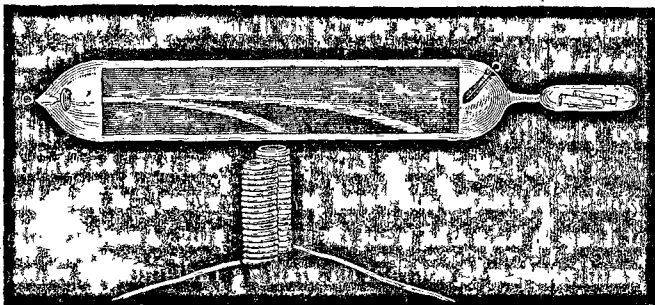


Fig. 248.

Cette action de l'aimant est très curieuse, et, si on l'étudie avec soin, elle révélera d'autres propriétés de la matière radiante. La figure 248 représente un tube exactement semblable au précédent, mais muni à l'une de ses extrémités d'un petit tube à potasse que l'on peut chauffer, de manière à rendre le vide un peu moins parfait. Lorsqu'on fait passer le courant d'induction, on voit le rayon de matière radiante tracer sur l'écran sa trajectoire courbe, sous l'influence de l'aimant en fer à cheval placé au-dessous. Observons la forme de la courbe. Les molécules lancées du pôle négatif peuvent être comparées aux projectiles qui partent d'une mitrailleuse, et l'aimant placé au-

dessous représente la terre, dont l'attraction courbe la trajectoire de ces projectiles. Cette trajectoire courbe est fidèlement tracée sur l'écran lumineux. Supposons maintenant que la force qui produit la déviation reste constante, la courbe tracée par le projectile variera avec la vitesse de celui-ci. Si l'on augmente la charge de poudre du canon, la vitesse du projectile sera plus grande et la trajectoire plus aplatie; et si l'on interpose un milieu résistant plus dense entre le canon et la cible, la vitesse du projectile diminuera, il suivra une courbe plus prononcée et atteindra plus rapidement le sol. Il n'est pas facile d'accroître la vitesse de ce courant de molécules radiantes en augmentant la force de la pile, mais on peut opposer aux molécules une résistance plus grande dans leur trajet d'un bout du tube à l'autre. Dans l'expérience faite par M. Crookes, on chauffe la potasse caustique avec une lampe à alcool, et on introduit dans le tube une trace de gaz de plus. Aussitôt l'effet se manifeste sur le courant de matière radiante. La vitesse est ralentie, le magnétisme a plus de temps pour agir sur les molécules individuelles, la trajectoire devient de plus en plus courbe, et enfin, au lieu de s'élancer presque jusqu'à l'extrémité du tube, les « projectiles moléculaires » touchent le fond du tube avant d'avoir parcouru plus de la moitié du chemin.

Il est très intéressant de vérifier si la loi qui régit la déviation magnétique de la trajectoire de la matière radiante est la même que celle dont l'exactitude a été établie pour des vides moins parfaits. Les expériences que l'on vient de décrire étaient faites avec un vide presque parfait. La figure 249 représente un tube où le vide est très imparfait. Quand on fait passer l'étincelle d'induction, elle traverse le tube sous la forme d'une ligne étroite de lumière violette

joignant les deux pôles. Sous le tube se trouve un électro-aimant puissant. En faisant passer le courant d'une pile dans l'électro-aimant, le centre de la ligne lumineuse se courbe vers l'aimant. En renversant les pôles, la ligne est repoussée vers la paroi supérieure du tube. Notons la différence entre les deux phénomènes. Ici l'action est temporaire. L'abaissement de la ligne lumineuse se produit sous l'influence magnétique; la ligne de décharge se relève ensuite et poursuit sa route vers le pôle positif. Dans le vide poussé très loin, au contraire, le courant de matière radiante, qui s'est incliné vers l'aimant, ne reprend pas sa

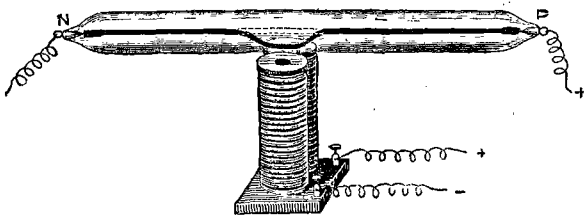


FIG. 249

direction première, mais continue son chemin dans la nouvelle direction.

Au moyen d'une petite roue (fig. 250), habilement construite par M. Gimmingham, M. Crookes pouvait montrer dans une lanterne électrique la déviation produite par un aimant. Le pôle négatif (*ab*) a la forme d'une coupe très peu profonde. En avant de cette coupe est un écran de mica (*cd*) assez large pour intercepter la matière radiante venant du pôle négatif. Derrière cet écran est une roue de mica (*ef*) avec une série de palettes. Avec cette disposition, les rayons moléculaires venant du pôle *ab* seraient interceptés avant d'arriver sur la roue et ne produiraient aucun mouvement. On place maintenant au-dessus du tube un

aimant g , qui dévie le courant moléculaire de façon à le faire passer au-dessus ou au-dessous de l'obstacle cd , et il en résulte aussitôt un mouvement rapide dans un sens ou dans l'autre, suivant la direction donnée à l'aimant. L'image de l'appareil était projetée sur l'écran. Les lignes en spirale peintes sur la roue montrent le sens dans lequel elle tourne. L'aimant était disposé de façon à attirer le courant molé-

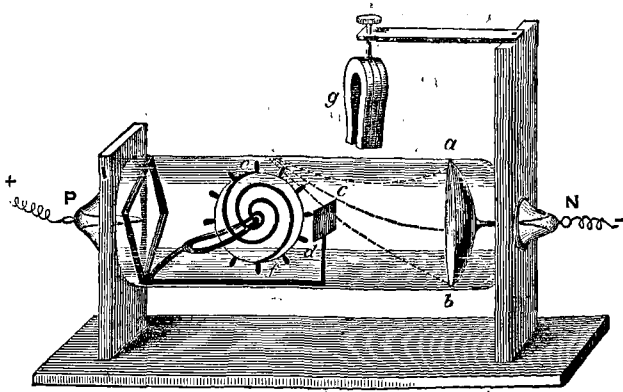


FIG. 250.

culaire vers le haut, afin qu'il vint frapper les palettes supérieures, et la roue tournait rapidement comme une roue hydraulique recevant l'eau en dessus. En tournant l'aimant de manière à repousser la matière radiante vers le bas, la roue diminuait de vitesse, s'arrêtait, puis commençait à tourner en sens inverse, comme une roue hydraulique recevant l'eau en dessous. Chaque renversement de position de l'aimant déterminait un renversement du mouvement de la roue.

.. Nous avons dit que les molécules de matière radiante, lancées du pôle négatif, sont électrisées négativement. Il est probable que leur vitesse est due à la répulsion mutuelle

entre le pôle et les molécules chargées de la même électricité. Dans un tube où le vide est moins parfait, comme celui de la figure 249, la décharge passe d'un pôle à l'autre, transportant un courant électrique comme si c'était un fil métallique flexible. Or, il est intéressant de rechercher si le courant de matière radiante émanant du pôle négatif transporte aussi un courant électrique. La figure 251 représente un appareil qui résout immédiatement la question. Le tube contient deux électrodes négatives (*ab*) placées l'une près de l'autre à une de ses extrémités, et une électrode positive (*c*) à l'autre extrémité. Cette disposition permet de lancer deux courants de matière radiante côte à côte le

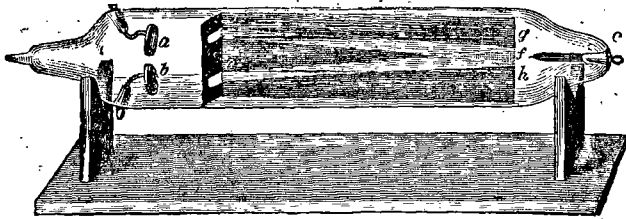


FIG. 251.

long de l'écran phosphorescent; ou bien un seul courant, en détachant un des pôles négatifs.

Si les courants de matière radiante transportent un courant électrique, ils agiront comme deux fils conducteurs parallèles et s'attireront; mais s'ils sont simplement composés de molécules électrisées négativement, ils se repousseront mutuellement.

Le pôle négatif supérieur (*a*) était d'abord relié à la bobine d'induction, et l'on voyait le rayon s'élançer le long de la ligne *df*. Puis on faisait entrer en jeu le pôle négatif inférieur (*b*), et une autre ligne *eh* s'élançait le long de l'écran. Aussitôt, la première ligne sautait de sa position

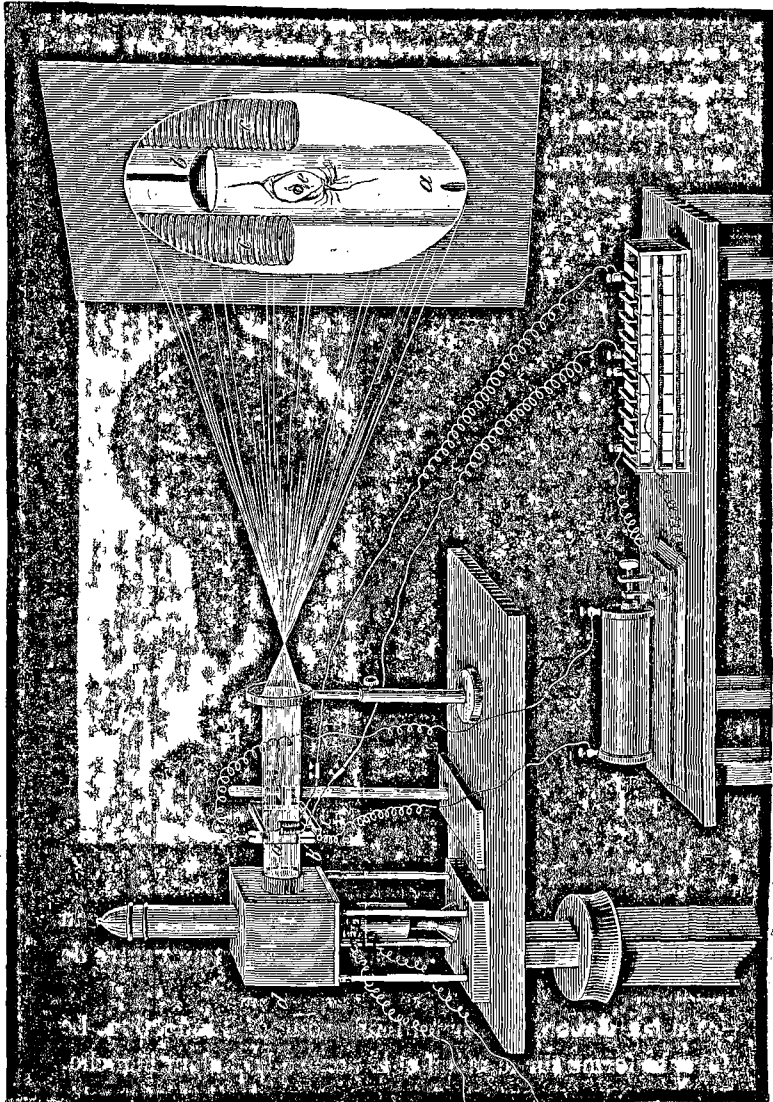
primitive *df* à la position *dg*, montrant qu'elle était repoussée, et le rayon inférieur était aussi dévié vers le bas ; par conséquent, les deux courants parallèles de matière radiante se repoussent mutuellement, agissant non pas comme les fils conducteurs d'un courant, mais simplement comme des corps chargés d'électricité de même nom.

LA MATIÈRE RADIANTE PRODUIT DE LA CHALEUR LORSQUE
SON MOUVEMENT EST ARRÊTÉ

La matière radiante a une autre propriété : le verre s'échauffe considérablement au point où la phosphorescence verte a le plus d'énergie. Le foyer moléculaire sur le tube de la figure 241 est extrêmement chaud.

M. Crookes présente un appareil qui rend visible à l'auditoire la chaleur de ce foyer.

Un petit tube (fig. 252) est muni d'un pôle négatif en forme de coupe. Cette coupe fait converger les rayons en un foyer situé vers le milieu du tube. A côté du tube se trouve un petit électro-aimant, que l'on peut mettre en action en touchant une clef, et le foyer est alors attiré sur la paroi du tube de verre (fig. 253). Pour rendre apparent le premier effet de la chaleur, le tube est enduit d'une couche de cire. L'appareil est disposé en avant de la lanterne électrique, et une image amplifiée du tube est projetée sur l'écran (pl. XLVIII). La bobine d'induction est alors mise en marche, et le foyer des rayons moléculaires se produit le long du tube. On fait passer le courant dans l'électro-aimant et le foyer est attiré sur la paroi du verre. On voit tout d'abord la couche de cire fondre sur un petit espace circulaire ; le verre commence bientôt à se désagréger, et des fentes rayonnent autour du centre de chaleur. Le verre se ramollit, il cède à la pression atmosphérique



Pl. XLVIII. — Matière radiante de Crookes.

qui le pousse en dedans, et enfin il fond. Un petit trou (*e*) s'ouvre au milieu, l'air se précipite dans le tube par cette ouverture; et l'expérience est terminée.

On peut rendre cette chaleur focale encore plus évidente en la faisant tomber sur un morceau de métal. La boule de verre (fig. 254) est munie d'un pôle négatif en forme de

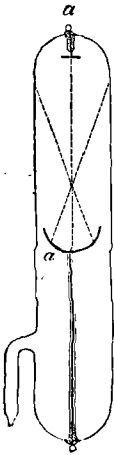


FIG. 252.

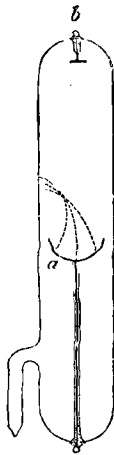


FIG. 253.

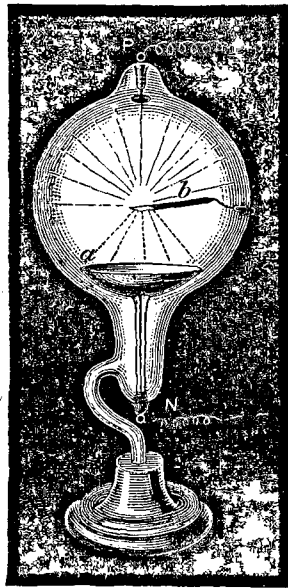


FIG. 254.

coupe (*a*), qui fait converger les rayons sur un morceau de platine-iridium (*b*) disposé sur un support au centre de la boule.

On fait d'abord passer un faible courant d'induction. Le foyer se forme sur le métal et le porte à la chaleur blanche. En approchant un petit aimant, le foyer de chaleur est dévié exactement comme le foyer de lumière dans l'autre

tube. En changeant la position de l'aimant, on fait monter ou descendre le foyer, ou on l'éloigne complètement du métal, qui cesse alors d'être lumineux. En retirant l'aimant afin de laisser les molécules agir librement, le métal redevient rouge blanc. En augmentant l'intensité de l'étincelle d'induction, le platine-iridium brille d'un éclat presque impossible à soutenir et finit par fondre (1).

(1) Le vide le plus parfait que M. Crookes ait réussi à obtenir jusqu'ici a été de un vingt-millionième d'atmosphère, ce que l'on comprendra mieux si nous disons qu'il correspond à environ un quart de millimètre (un centième de pouce) pour une colonne barométrique de plus de 4800 mètres de hauteur (de trois milles).

APPENDICE

AUX CHAPITRES XXXVI ET XXXVII

DE L'ÉTAT SENSITIF DES DÉCHARGES DANS LE VIDE (2^e partie)

Le 8 avril 1880, MM. W. Spottiswoode et Moulton ont communiqué à la Société Royale la deuxième partie de leurs recherches sur l'état sensitif des décharges dans le vide.

INTRODUCTION

Dans la première partie de leurs recherches, les auteurs ont établi que les décharges sensitives sont produites par une succession rapide de décharges d'électricité libre émanant d'une des électrodes ou des deux électrodes du tube, chaque décharge individuelle étant *instantanée*, c'est-à-dire ayant une durée si courte qu'elle est négligeable en comparaison de l'intervalle qui sépare deux décharges. Les effets obtenus quand on approche un conducteur d'un tube contenant une décharge sensible sont dus à l'induction statique ordinaire que l'électricité libre + ou —, qui compose cette décharge, exerce sur l'espace environnant pendant son passage à travers le tube. Cette action inductive, combinée avec l'instantanéité de la décharge et par conséquent de l'apparition de l'électricité libre dans une partie quelconque du tube, produit une action électrique impulsive sur les parois du tube et dans le milieu extérieur au tube, laquelle conduit à un nouvel arrangement instantané de l'électricité dans le conducteur, d'où résultent des décharges dirigées des parois du tube vers l'espace situé dans son voisinage immédiat.

Leurs expériences subséquentes ont confirmé cette manière de voir et font ressortir encore l'importance de l'étude de la décharge sensitive au point de vue de la théorie générale de l'électricité, car cette étude n'est autre chose que l'étude de l'étincelle électrique. Chacune

des décharges instantanées constitue, en effet, une décharge bien distincte et bien isolée, et la répétition rapide de ces décharges individuelles a seulement pour effet de rendre visible le phénomène que chacune d'elles aurait présenté si on eût pu l'observer séparément. Ce qu'on observe, en réalité, c'est donc le phénomène du passage de l'étincelle électrique à travers les gaz raréfiés.

L'intérêt de ces recherches s'accroît encore quand on considère leurs rapports avec la décharge continue. Celle-ci est à l'arc électrique ce que la décharge sensitive est à l'étincelle. Les modifications qu'éprouvent ces deux types de décharge, quand on les fait passer à travers des milieux raréfiés, offrent une telle ressemblance, qu'il n'est pas douteux que les résultats de M. Warren de la Rue, concernant le mode de développement de l'arc électrique par la décharge continue dans le vide, ne s'appliquent au développement de l'étincelle électrique par la décharge intermittente ou sensitive dans le vide.

Dans le présent mémoire, les auteurs ont étendu au cas des vides extrêmes les conclusions qu'ils avaient tirées, dans leur premier mémoire, d'expériences faites dans des tubes où la raréfaction n'atteignait pas 1^{mm} de mercure. Leur point de départ, conforme à la manière de voir adoptée dans le mémoire précédent, est que les décharges intermittentes qui produisent la décharge sensitive dans le vide passent dans le tube par l'effet de la tension locale existant à l'électrode et sous la forme d'électricité libre, jusqu'à ce qu'elles soient neutralisées par des décharges d'espèce contraire, ordinairement à l'électrode opposée du tube. Ce passage à travers le tube est extrêmement rapide, sans être réellement instantané ; la portion du tube qui est en avant de la décharge est en quelque sorte dans un état de vide électrique, tandis que celle qui est en arrière est remplie par l'électricité libre de la décharge.

Les auteurs ne reviendront plus sur la question de la nature et de la formation des stries, car ils n'ont rien à ajouter aux explications déjà données, et, d'ailleurs, les vides extrêmes dans lesquels ils ont opéré ne sont pas propres à la production des décharges stratifiées. Néanmoins, les idées de luminosité positive et d'espace obscur négatif conservent toujours la même importance, car elles constituent les éléments fondamentaux de toutes les décharges dans le vide. Ils adoptent le langage de la théorie des deux fluides, mais pour la commodité de l'exposition seulement.

DE L'EFFET DES ACTIONS INDUCTIVES INTERMITTENTES ET IMPULSIVES
SUR LES DÉCHARGES CONTINUES DANS LE VIDE

Les décharges étudiées dans le précédent mémoire (1) étaient discontinues, et les influences qui produisaient l'effet « spécial » et celui de « détente » étaient liées plus ou moins directement à l'intermittence de la décharge. Les décharges que l'on va étudier sont continues (continu étant l'équivalent de non-sensitif), et les effets exercés sur elles proviennent de l'action intermittente d'un système électrique tout à fait distinct,

Les expériences se font avec deux machines de Holtz : l'une comprenant douze plateaux mobiles d'ébonite et douze plateaux fixes de verre ; l'autre six. On fait passer la décharge de la plus grande des machines à travers un tube où le gaz est raréfié à la pression de 2^{mm} (vide modéré), en ayant bien soin qu'il n'y ait pas d'interposition d'étincelle dans le circuit, afin que la décharge ne soit ni intermittente ni sensitive. Le milieu du tube est entouré d'un anneau étroit de feuille d'étain, relié par un fil conducteur à l'une des électrodes de la plus petite machine. Les électrodes de la première machine étant séparées et celles de la seconde réunies, la décharge de la première passe dans le tube sous la forme d'une décharge ordinaire non sensitive et n'est pas affectée par la présence de l'étain ; mais dès qu'on sépare les électrodes de la première machine, les étincelles qui éclatent entre elles altèrent la tension électrique aux deux électrodes, en déterminant une chute soudaine de leur potentiel $+$ ou $-$, et ces changements se communiquent à la feuille d'étain reliée métalliquement à l'une d'elles.

Si la feuille d'étain est reliée à l'électrode $-$ de la petite machine, elle prend une charge $-$ dans l'intervalle de deux étincelles consécutives ; cette charge disparaît dès que l'étincelle éclate ; en d'autres termes, il se produit, dans l'anneau d'étain, un changement équivalent à l'arrivée subite d'une charge $+$, et ce phénomène se reproduit chaque fois qu'une étincelle passe, c'est-à-dire plusieurs centaines de fois par seconde, si les électrodes de la petite machine sont peu écartées. On obtient ainsi un nombre égal d'impulsions soudaines $+$ par seconde, l'intervalle qui sépare deux impulsions étant occupé par l'arrivée sur l'étain d'une charge $-$ graduelle et continue. En d'autres termes, on reproduit dans l'anneau d'étain une ac-

(1) Voir chap. xxxvi.

tion identique à celle qui a lieu quand un anneau d'étain entoure un tube traversé par une décharge rendue intermittente par une étincelle d'air à l'électrode positive et que l'anneau est relié à cette électrode; en donnant à l'étincelle d'air qui sépare les électrodes de la petite machine une longueur convenable, on obtiendra donc un effet analogue à l'effet spécial positif (c'est-à-dire séparation de la colonne +, la portion tronquée terminée par un contour arrêté et brillant, et le cône creux de lumière séparé par un espace obscur de cette portion tronquée). Ceci montre que la présence de décharges synchrones, émanant de l'électrode positive, n'est pas essentielle pour la formation des apparences types associées jusqu'ici seulement

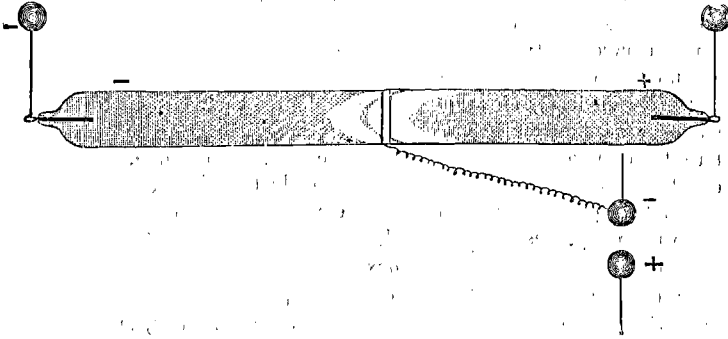


FIG. 255.

à l'effet positif spécial ou à l'effet de détente négative qui en est le phénomène corrélatif.

Si la longueur de l'étincelle d'air n'est pas trop grande, on constate que la décharge, dans la portion de tube comprise entre la feuille d'étain et électrode négative, est sensitive et donne tous les signes d'intermittence positive, tandis qu'elle n'est pas sensitive dans la portion comprise entre la feuille d'étain et l'électrode positive. Si on place deux autres tubes dans le circuit du tube muni de l'anneau d'étain, un à chaque bout (entre le bout et l'électrode de la grande machine), on constate, en approchant le doigt, que le tube placé à l'extrémité négative contient une décharge sensitive, et le tube placé à l'extrémité positive une décharge non sensitive (1).

(1) Cette expérience montre la différence essentielle qui existe entre le passage de l'électricité à travers les conducteurs et son passage à travers les gaz. Elle montre qu'un courant qui, dans une partie de son circuit, traversé

Si la feuille d'étain est reliée à l'électrode positive de la petite machine, on a dans le tube des décharges négatives, et les intermittences sont du type négatif. On produit donc avec cette disposition le phénomène de répulsion de la luminosité positive et toutes les apparences de l'effet de la *détente positive* ou de l'*effet spécial négatif* (1).

MÉTHODE DU TUBE ÉTALON POUR L'EXAMEN DES DÉCHARGES INTERMITTENTES DANS LE VIDE

Des phénomènes qui précèdent les auteurs ont tiré un nouveau moyen de reconnaître l'intermittence des décharges dans le vide. Ce moyen diffère essentiellement de ceux décrits dans le précédent mémoire en ce que les effets lumineux, qui permettent de reconnaître la nature de l'intermittence, sont produits non plus dans le tube que l'on examine, mais dans un tube distinct choisi de façon à ce que ces effets se manifestent clairement et qu'ils appellent le *tube étalon*. L'emploi de cette méthode leur a permis d'étendre leurs résultats aux vides extrêmes.

Le tube étalon, qui est ordinairement un tube d'hydrogène ou d'azote, de résistance très faible, mais très long et très large, est mis en circuit entre les électrodes de la machine de Holtz, et traversé d'une façon continue par la décharge de la machine. Un anneau étroit d'étain est placé autour du tube étalon et relié par un fil métallique

un gaz peut être rendu intermittent dans une partie de son trajet, tout en restant sensiblement continu dans l'autre. Il y a là une différence radicale avec la loi de Ohm et la théorie générale des courants à travers les conducteurs, qui exigent qu'à un instant quelconque la quantité d'électricité qui traverse une section quelconque du circuit soit la même. Il est clair que la quantité *moyenne* qui traverse chaque section doit être la même, qu'il y ait ou non dans le circuit des parties gazeuses; mais l'égalité existe seulement dans la *moyenne* quand elle est prise pour une période de temps fixe et appréciable, et non plus à chaque instant. Le tube agit précisément comme le réservoir d'air d'une pompe à incendie. Toute l'électricité qui arrive le traverse, mais sans conserver les mêmes pulsations: le tube contient tantôt plus, tantôt moins d'électricité libre, et agit comme un vase élastique qui ferait partie du trajet d'un courant de fluide incompressible.

(1) Le meilleur moyen d'observer l'effet d'intermittence produit dans la décharge principale par les impulsions négatives est de placer le doigt sur le tube entre la feuille d'étain et l'électrode positive. Le signe usuel de l'intermittence négative se manifestera aussitôt sous la forme d'une luminosité émanant de la surface intérieure du tube au-dessous du doigt.

à un petit disque de métal fixé à l'extrémité d'une tige de verre que l'on tient à la main. Pour reconnaître l'intermittence de la décharge dans un tube, il suffit de mettre le disque de métal en contact avec ce tube. Quand des décharges intermittentes passent dans le tube, le disque envoie dans le fil de l'électricité de même espèce que celle des pulsations d'électricité libre traversant le tube; cette électricité, arrivant sur l'anneau d'étain du tube étalon, produit par induction, dans ce dernier, des décharges dont l'intermittence positive ou négative se manifeste par ce que l'on appelle les effets positifs ou négatifs (1).

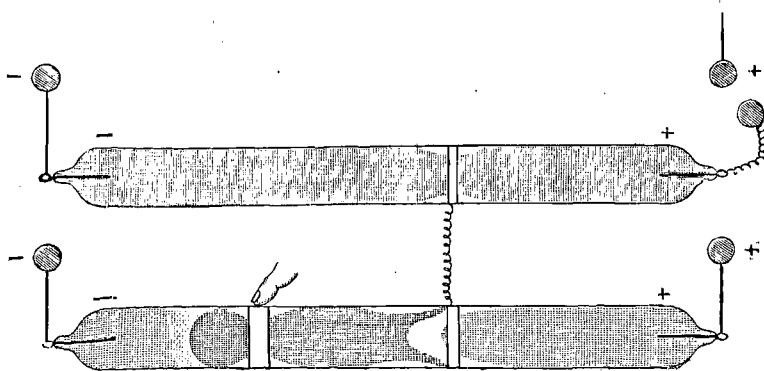


FIG. 256.

Il est utile de disposer, comme le montre la fig. 256, autour du tube étalon, un second anneau d'étain non relié au tube que l'on examine; en touchant cet anneau, on découvre immédiatement la nature de l'intermittence produite dans le tube étalon par la décharge inductive due à l'influence du tube que l'on examine.

DE L'EFFET DE BOUTEILLE DE LEYDE DES TUBES A VIDE

On sait qu'un tube à vide qui a été traversé par une décharge reste

(1) Rappelons que les effets positifs consistent en décharges partant de l'intérieur de la surface du tube, soit sous la forme d'une simple luminosité positive, soit sous la forme plus parfaite d'un cône creux accompagné de la colonne positive tronquée et de l'espace obscur intermédiaire; et que les effets dus aux intermittences négatives produisent un étranglement de la colonne positive, ou, si l'action est très intense, le même effet qu'une électrode en forme d'anneau.

souvent fortement chargé : le gaz du tube ou la surface intérieure du verre retient une grande quantité d'électricité libre. De plus, un tube à vide est capable d'amener une détente considérable dans la décharge sensitive qui traverse un autre tube, comme le ferait un conducteur de grande capacité. Cette capacité d'un tube à vide est beaucoup accrue par le passage d'une décharge continue. C'est ce qu'on vérifie facilement avec un tube étalon. Si on note l'effet de détente produit sur le tube que l'on examine, quand on relie un morceau de feuille d'étain placé sur sa surface à un morceau de feuille d'étain placé sur le tube étalon, et qu'on arrête subitement la décharge dans le tube étalon, on voit immédiatement l'effet de détente dans le tube examiné. Au lieu d'un effet de décharge, on n'a plus qu'une simple répulsion, ce qui prouve une diminution dans la capacité du système qui produit la détente.

L'attention des auteurs a été appelée sur la capacité des tubes à vide par ce fait singulier que, lorsqu'on touche un tube contenant une décharge sensitive, tantôt on éprouve un choc et tantôt on n'en éprouve pas, la longueur de l'étincelle d'air étant toujours la même. Ils ont reconnu que l'on ressentait des chocs dans le cas où on mettait en communication avec la terre l'électrode de la machine qui est séparée du tube par l'étincelle d'air, et dans ce cas seulement. Ce fait s'explique facilement : supposons l'étincelle d'air dans la partie négative du circuit, c'est-à-dire l'électrode + de la machine reliée métalliquement à l'électrode + du tube, et l'étincelle d'air située entre les électrodes négatives du tube et de la machine : on ressent un choc violent quand l'électrode — de la machine est reliée à la terre. Le côté négatif de l'étincelle d'air étant au potentiel zéro, l'électricité positive qui s'accumule sur le côté positif de l'étincelle ne provient pas de l'influence du côté négatif; elle provient de l'électricité qui s'accumule à l'électrode + de la machine, *traverse le tube* et, arrivant à l'électrode — du tube, charge le côté positif de l'intervalle où se produit l'étincelle. Le tube se charge donc; quand vient une décharge, le tube se vide comme une bouteille de Leyde, et la quantité d'électricité qui passe s'accroît de toute l'électricité que contenait le tube. Le choc produit par l'effet inductif de cette décharge subite sera donc violent.

Si, au contraire, l'étincelle d'air étant toujours négative, on met l'électrode + de la machine à la terre, l'électrode + du tube est au potentiel zéro, le tube ne se charge donc pas, et la décharge résulte simplement de l'électricité accumulée sur l'électrode négative de la machine.

Cet effet de bouteille de Leyde se manifeste dans tous les tubes,

quelle que soit la longueur de l'étincelle d'air; mais, dans les tubes où le vide est poussé très loin, l'effet se complique; car souvent le tube présente une résistance plus grande que celle de l'intervalle de l'étincelle.

DE LA PHOSPHORESCENCE DANS LES TUBES A VIDE (1)

Les décharges, dans les tubes où la raréfaction du gaz a été poussée fort loin, sont accompagnées d'un phénomène remarquable : nous voulons parler de la phosphorescence qui apparaît dans l'intérieur du tube, spécialement dans le voisinage de l'électrode négative. La cause immédiate de ce phénomène est hors de conteste : MM. Goldstein et Crookes ont démontré qu'il est dû à des courants de molécules ou particules de même nature qui sont projetées de l'électrode négative pendant la décharge. Animées de vitesses considérables, elles viennent heurter le verre et, par le choc, elles lui communiquent une énergie suffisante pour le rendre lumineux et le porter à une température élevée. Il est établi que la couleur particulière de la lumière qui se manifeste dépend seulement de la composition du verre, et pas du tout de la matière dont l'électrode est formée : en fait, le verre lui-même peut servir d'électrode. La configuration de la lueur phosphorescente dépend, sans doute, de celle de l'électrode et de celle de la surface du verre sur laquelle elle se forme; mais, comme cette lueur n'a pas de connexion directe avec la luminosité du gaz lui-même, elle ne peut donner d'indication directe sur ce qui se passe dans le tube et atteste seulement l'existence de ces courants moléculaires émanant de l'électrode négative.

On a cependant émis l'hypothèse qu'elle indiquait que le gaz renfermé dans le tube se trouvait dans un état physique très différent de l'état gazeux ordinaire, notamment sous le rapport de la longueur du libre parcours de ses molécules et de la fréquence de leurs collisions mutuelles. Notre opinion est que cette supposition n'est pas suffisamment fondée, et qu'au contraire les phénomènes sont compatibles avec la théorie moléculaire ordinaire des gaz. Nous allons exposer les faits d'expérience sur lesquels repose notre manière de voir.

On a un certain nombre d'exemples de courants moléculaires émanant de la surface de corps fortement chargés d'électricité : ainsi la *vent électrique*, que l'on observe quand une machine électrique est munie d'une électrode en pointe, et dont la réaction peut faire tour-

(1) Voir chapitre xxxvii.

ner un tourniquet, de même qu'une décharge électrique fait tourner le radiomètre électrique de Crookes dans le vide. On sait que ce phénomène est dû à la répulsion entre le corps fortement électrisé et les molécules d'air voisines qui s'électrisent à son contact.

Ce phénomène diffère toutefois des courants moléculaires qui produisent la phosphorescence dans le vide, car il est commun aux pôles positif et négatif et se produit même plus aisément au pôle positif.

On sait aussi que dans l'arc électrique il y a un courant constant de particules de charbon du pôle positif au pôle négatif. On a imaginé, sur ce principe, un moyen de recouvrir le verre de platine, en faisant déposer ce métal à l'aide d'une électrode de platine placée près du verre et reliée à une source d'électricité à haute tension. Mais, dans tous ces exemples, les phénomènes se produisent aux deux électrodes, ou même mieux à l'électrode positive.

Si des phénomènes qui ont lieu aux pressions atmosphériques ordinaires nous passons aux décharges dans les gaz raréfiés, l'analogie est bien plus grande.

C'est un fait bien connu que, si l'on pose sans adhérence sur l'électrode négative d'un tube à gaz raréfié de petites particules métalliques, un courant électrique puissant les transporte le long du tube vers l'électrode positive. Si on met un peu de noir de platine sur l'électrode négative, la décharge d'une bobine ordinaire le transporte malgré la grande densité de ses particules. L'expérience réussit également avec la plombagine, le noir de fumée et l'acier finement divisé; mais les mauvais conducteurs, tels que la poudre de lycopode et le sable, ne sont pas affectés de la même manière. Tous ceux qui se sont servis de tubes à vide avec électrodes de platine, ont remarqué que la portion du tube autour de l'électrode négative se couvre d'une mince couche de platine due aux petites particules du métal projetées de l'électrode par la décharge.

Les auteurs pensent que les courants moléculaires qui produisent la phosphorescence dans le vide ne sont pas d'une nature différente de celle des phénomènes que l'on vient de rappeler et citent à l'appui ce fait, démontré par Plücker, que le dépôt métallique formé autour de l'électrode négative suit les courbes magnétiques, si ce dépôt est placé dans un champ magnétique; d'où il résulte que les particules de platine sont affectées par un aimant comme le sont les particules dans les courants moléculaires.

L'hypothèse que ces courants dépendent d'une modification spéciale dans la structure gazeuse du milieu traversé par la décharge doit apparemment son origine à l'idée que la phosphorescence est un

phénomène particulier aux vides extrêmes, et à celle que les particules qui le produisent (et qui sont vraisemblablement des molécules du gaz contenu dans le tube) ne se choquent plus dans leurs mouvements, comme dans l'état ordinaire. Mais ces deux idées ne peuvent se soutenir. L'observation montre que la phosphorescence se produit dans presque tous les tubes à vide; la seule condition est que la violence de la décharge émanant de l'électrode négative soit suffisante, en tenant compte de la forme et des dimensions du tube et de son électrode négative ainsi que du degré du vide. On obtient ce degré de violence dans les vides extrêmes sans dispositions spéciales et avec un courant continu d'énergie convenable. Il n'en est pas de même dans les vides moindres, mais on lève la difficulté en augmentant la violence de la décharge négative par l'introduction d'une étincelle d'air. Un tube à vide modéré, placé dans le circuit d'une machine de Holtz, manifeste de la phosphorescence à son électrode négative, dès qu'on introduit une étincelle d'air dans le circuit, alors qu'il ne présente rien de semblable quand la décharge est continue. La décharge intermittente, plus violente que la décharge continue, donne aux courants moléculaires la vitesse convenable pour que le choc contre le verre produise la phosphorescence : de plus cet accroissement de violence s'obtient soit directement, comme dans le cas de l'étincelle négative, soit par voie de réponse à une violente décharge positive dans le tube, comme dans le cas de l'étincelle positive. (Ce fait tend à écarter l'idée que l'émission des courants moléculaires indique que la décharge électrique dans le vide a une direction spéciale et que c'est un « flux négatif ».)

Mais on peut produire encore la phosphorescence dans d'autres parties du tube que le voisinage immédiat de l'électrode négative, et dans des conditions qui montrent clairement que le phénomène ne dépend pas de l'extrême raréfaction du gaz. On sait, en effet, que l'existence d'une luminosité brillante est incompatible avec celle d'un vide poussé très loin. Or, si l'on fait passer un courant énergique dans un tube à vide assez modéré pour obtenir une colonne positive lumineuse, et qu'on introduise dans le circuit une étincelle d'air de grande longueur, le contact du doigt avec le tube amène presque toujours de la phosphorescence sur le côté opposé du tube.

On peut encore augmenter la violence de la décharge négative de façon à produire la phosphorescence dans des conditions où elle ne se manifeste pas d'ordinaire, par la disposition imaginée par notre aide, M. Ward, et décrite page 199, fig. 222. Le pôle positif d'une machine de Holtz est relié à un morceau de feuille d'étain placé sur l'extérieur du tube, dont une des électrodes est reliée au pôle né-

gatif de la machine. En écartant les pôles de la machine de 12 millimètres, on obtient un courant d'étincelles violentes, qui détermine au pôle +, et par suite sur l'étain, des chutes soudaines de tension + ou des augmentations de tension —, ce qui équivaut à des impulsions négatives.

Enfin, on a obtenu par ce procédé de la phosphorescence dans des tubes où la pression du gaz était augmentée graduellement, soit en chauffant de la potasse placée dans le tube, soit en introduisant lentement de l'air par un robinet, jusqu'à atteindre 12 millimètres de mercure. La phosphorescence s'affaiblit graduellement à mesure que la pression augmente; quand elle disparaît, on observe, en faisant passer un courant dans le tube, qu'il n'y a plus de phosphorescence lumineuse sauf dans le voisinage immédiat des deux électrodes, ce qui est la preuve d'un vide très modéré; et comme aucun changement brusque ne caractérise le moment de sa disparition, rien ne peut faire supposer qu'elle cesse brusquement d'exister au moment où elle cesse d'être visible.

Il n'est même pas indispensable d'augmenter la violence de toute la décharge, il suffit que l'action locale, à l'électrode négative, ait une intensité suffisante. En effet, quand l'une des électrodes du tube est beaucoup plus petite que l'autre, il y a un degré de vide pour lequel la phosphorescence est visible quand la petite électrode est négative, et n'apparaît pas quand on renverse le courant. De même la longueur d'étincelle qui produit la phosphorescence est moindre quand la petite électrode est négative que si elle est positive. Ainsi, toutes choses égales d'ailleurs, il suffit pour produire la phosphorescence de diminuer les dimensions de l'électrode négative, de façon à rendre l'action locale plus violente.

Il est donc démontré que le phénomène des courants moléculaires peut être produit à des pressions qu'on peut appeler les pressions ordinaires des gaz.

Nous allons prouver en second lieu qu'il n'y a pas de raison concluante de supposer que les molécules de gaz qui constituent la décharge n'obéissent pas aux lois ordinaires qui régissent les milieux gazeux. Sans doute leur projection originale est un phénomène exceptionnel, mais on va voir que ces courants moléculaires sont choqués dans leur course par le gaz environnant, comme d'autres courants (de matières gazeuses ou solides) le seraient dans les mêmes circonstances.

En effet, la seule explication de ce fait que le phénomène apparaît tout d'abord dans le voisinage de l'électrode négative, est que le gaz du tube s'oppose au passage des courants moléculaires et diminue

leur vitesse. L'expérience suivante montre maintenant que la résistance opposée par le milieu gazeux croît avec la densité du gaz. Pour pouvoir comparer les courants moléculaires à des distances variables de leur source, toutes choses égales d'ailleurs, on prend un tube d'un diamètre de 50 millimètres (fig. 257), dans lequel on introduit un bout de tube d'un diamètre extérieur de 38 millimètres. Le tube étant horizontal, la distance de la surface intérieure du tube à la surface extérieure du bout, va en diminuant de 12 millimètres sur le côté supérieur, à 0 sur le côté inférieur où les tubes sont en contact.

On produit la phosphorescence par l'arrangement de M. Ward, à l'aide duquel, en déplaçant le disque de feuille d'étain autour du grand tube, on donne aux courants moléculaires, lancés de la surface intérieure du grand tube, des parcours variant de 12 millimètres à 0.

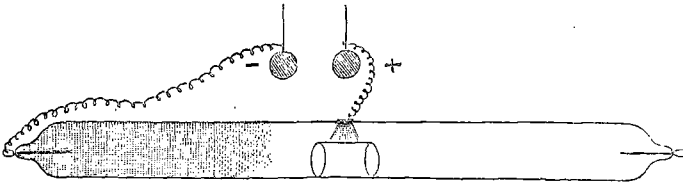


FIG. 257.

Le tube étant mis en communication avec une pompe à air d'Alvergniat, on détermine la distance maxima à laquelle on peut obtenir la phosphorescence, au moyen de la détente, pour diverses pressions du gaz, en déplaçant l'étain de façon à l'amener à la position où la phosphorescence devient visible sur la surface extérieure du tube intérieur. Le gaz étant de l'air, et avec une machine de Holtz faisant trois cents tours par minute, et une étincelle d'air de $12^{\text{mm}},5$, on a obtenu les résultats suivants :

A la pression de 5 millimètres, la distance parcourue par les courants moléculaires était de 12 millimètres ; à la pression de 22 millimètres, elle était de 5 millimètres ; à la pression de 24 millimètres, elle était de 2 millimètres ; et à la pression de 26 millimètres, la phosphorescence ne se produisait que quand les deux tubes étaient presque en contact.

L'expérience suivante montre encore que les courants moléculaires obéissent aux lois ordinaires des résistances gazeuses. On prend un tube dans lequel le vide a été fait en absorbant le gaz à l'aide de la potasse mise dans une chambre placée à un bout. On adapte le disposit i

de M. Ward et on chauffe la potasse de manière à augmenter la pression jusqu'à ce que la phosphorescence disparaisse. On place alors un pôle d'électro-aimant au-dessous du tube et en regard de la feuille d'étain. L'effet de cet aimant sera de concentrer les courants moléculaires et de les faire mouvoir en masse plus compacte, en sorte que, si la disparition de la phosphorescence tient simplement à la perte de vitesse qu'éprouvent les particules en rencontrant des gaz d'une densité plus grande, l'aimant leur permettra d'arriver à l'autre côté du tube et d'y produire la phosphorescence. C'est, en effet, ce que l'on observe : en arrêtant le passage du courant dans l'électro-aimant, la phosphorescence disparaît. En reliant le tube à une pompe d'Alvergniat munie d'un manomètre, on constatait que sans l'aimant on obtenait la phosphorescence à une pression de 6 millimètres, et avec l'aimant à une pression de 9 millimètres.

Pour montrer avec quelle facilité les particules mobiles perdent leur vitesse en traversant le gaz du tube, on faisait le vide dans un tube contenant de nombreuses pellicules de verre extrêmement ténues, jusqu'à ce qu'on obtint la phosphorescence avec une longue étincelle d'air positive. En touchant le tube avec le doigt (ce qui a pour effet de provoquer des courants moléculaires s'élançant de la surface intérieure du tube au point où le doigt repose), la phosphorescence apparaissait sur les pellicules en regard du doigt. Le choc des molécules fait mouvoir ces pellicules, comme dans le cas du moulinet de Crookes, mais très peu. Toutefois, si on place le doigt juste au-dessous d'une pellicule, elle se meut plus vite : ainsi, bien que la quantité de mouvement que conservent les molécules après avoir traversé le tube ne soit pas suffisante pour faire mouvoir les pellicules, la quantité initiale de mouvement est cependant bien suffisante pour cela.

En résumé, on peut obtenir la phosphorescence à des pressions comparables aux pressions ordinaires des gaz, et il est inutile de supposer un changement dans les lois ordinaires des gaz; mais les courants moléculaires perdent rapidement leur vitesse sous l'action des résistances gazeuses, en sorte que, même dans les cas où la phosphorescence n'est pas visible, les courants moléculaires existent cependant et peuvent produire encore la phosphorescence si on empêche leurs vitesses d'être ralenties par le choc du gaz qu'ils traversent. La résistance que ces courants moléculaires éprouvent de la part du milieu résulte aussi des expériences de Crookes avec le radiomètre électrique, qui montrent que ces courants pénètrent rarement au-delà de ce que l'on appelle la lueur négative avec une force suffisante pour affecter le radiomètre.

Les résultats précédents montrent également que de la longueur du chemin parcouru par les courants moléculaires on ne peut tirer aucune conclusion, quant au parcours libre moyen des molécules de gaz ou à la fréquence de leurs collisions. Il est certain qu'à la pression de 6 millimètres de mercure, les gaz suivent leurs lois ordinaires, que le parcours libre moyen des molécules gazeuses est infiniment petit et le nombre de leurs collisions dans un temps fini extrêmement grand. Et cependant, à cette pression, la phosphorescence se produit à une distance d'au moins 5 centimètres.

Quoique pour nous la phosphorescence n'ait pas un caractère aussi exceptionnel que celui qu'on a voulu lui donner, elle n'en conserve pas moins son importance comme phénomène caractéristique de la décharge électrique ; mais cette importance tient à ce fait qu'elle se manifeste d'autant mieux que le vide est plus parfait, sans être cependant spéciale à un degré de vide déterminé, et qu'elle devient le seul phénomène visible de la décharge dans les vides extrêmes, quand les autres caractéristiques de la décharge (luminosité positive, etc.) ont disparu. Sous un rapport même, les indications que donne la phosphorescence sont mieux définies que celles fournies par les autres phénomènes lumineux, parce qu'elle annonce toujours l'existence d'une décharge négative : si nous parvenons donc à reconnaître la direction des courants moléculaires, elle permettra de préciser la position de la source de cette décharge. De là son intérêt au point de vue de la découverte du mécanisme de la décharge : elle est la principale source de nos connaissances sur ce sujet.

DE LA DÉCHARGE SENSITIVE DANS LES VIDES EXTRÊMES

L'état sensitif existe dans les décharges à travers les tubes extrêmement raréfiés quand le courant a l'intermittence brusque qui est la condition essentielle de son existence dans les tubes où le vide est moindre.

En examinant la décharge dans un tube très raréfié donnant la phosphorescence, on voit en général une colonne nébuleuse mais définie, de couleur verdâtre ou pourpre, partant de l'électrode + du tube. Elle représente la colonne positive que l'on voit dans les décharges ordinaires ; car, si on fait le vide pendant que le courant passe, la luminosité positive se transforme par degrés continus en cette nébulosité. Tant qu'il n'y a pas d'interruption dans le circuit extérieur au tube, cette nébulosité est indifférente à l'approche d'un conducteur ; mais elle devient sensitive quand on introduit une étincelle d'air positive. Quand le vide est poussé si loin que la nébulosité dis-

paraît et que la phosphorescence seule subsiste, celle-ci change quand on approche un conducteur, et on peut lui appliquer encore le terme de sensitive. L'effet est peu marqué quand l'étincelle d'air est négative, mais on reconnaît alors que la phosphorescence est très sensitive en approchant un conducteur relié métalliquement à l'électrode négative du tube. On constate ainsi que la sensibilité dans les vides extrêmes apparaît dans les mêmes conditions que dans les tubes déjà examinés, c'est-à-dire en introduisant une étincelle d'air dans le circuit d'une machine à courant continu. Cependant, plusieurs des méthodes qui pouvaient être employées pour produire la sensibilité dans les tubes à vide modéré sont inapplicables dans ceux à vide extrême, en raison de leur grande résistance : avec la machine de Holtz et un interrupteur à roue, il arrive souvent que le ressort de platine passe sur la division suivante de la roue avant que la machine ait une charge suffisante pour donner au courant une intensité qui lui permette de traverser le tube. L'intermittence de la décharge sensitive dans les vides extrêmes se démontre encore en plaçant un téléphone dans le circuit compris entre la terre et une feuille d'étain placée sur le tube, ainsi que par le miroir tournant.

Dans leurs expériences, les auteurs supposent toujours l'intermittence produite par une étincelle d'air située dans la portion positive ou négative du circuit extérieur.

Lorsque l'étincelle d'air est positive, la décharge traverse toujours le tube sous forme d'électricité + et vice versa, ce qui revient à dire que les résultats généraux du précédent mémoire s'appliquent aux vides extrêmes. Si ce fait est prouvé, il en résulte qu'il n'y a pas de différence radicale entre la nature de la décharge dans les vides modérés et extrêmes, et qu'on doit rejeter l'idée (suggérée par le phénomène de la phosphorescence) que dans les vides extrêmes la décharge vient seulement de l'électrode négative. Tant que la nébulosité subsiste, elle se comporte comme la luminosité positive dans les tubes, où le vide est moindre, sous l'action du doigt ou de l'anneau d'étain. L'expérience est plus difficile cependant quand l'étincelle d'air est négative.

On peut encore établir une forte présomption en faveur du fait énoncé, en observant les phénomènes de la décharge d'une façon continue à mesure que l'on raréfie le gaz de plus en plus dans le tube; mais on a une preuve directe en employant la méthode du tube-étalon, lequel, traversé par un courant continu, manifeste des effets du type positif ou du type négatif suivant que l'étincelle d'air est + ou —, montrant ainsi que les décharges traversent le tube principal sous forme d'électricité positive ou négative.

La phosphorescence existe dans les décharges sensibles comme dans les décharges continues, et quand elle se manifeste dans les décharges sensibles, elle a le caractère d'intermittence commun à tous les autres effets lumineux.

Si un tube, raréfié jusqu'à un degré suffisant pour produire la phosphorescence quand il est traversé par une décharge continue, est mis dans le circuit des électrodes d'une machine de Holtz et qu'on introduise dans le circuit une étincelle d'air, le seul effet éprouvé par la phosphorescence est une augmentation d'éclat et quelquefois une légère altération dans sa position et sa distribution. En substance, le phénomène reste le même qu'avant l'introduction de l'étincelle, montrant ainsi que l'intermittence de la décharge n'empêche pas le pôle négatif d'émettre les courants moléculaires auxquels la phosphorescence est due et qu'au contraire elle favorise cette émission.

A l'œil, la phosphorescence de la décharge intermittente ou sensitive paraît aussi continue que celle de la décharge continue. Mais, en examinant le tube à travers une fente étroite à l'aide d'un miroir tournant, on constate que la luminosité verte est intermittente, comme la décharge elle-même.

Le fait que l'illumination du tube est plus intense avec un courant intermittent qu'avec un courant continu prouve que les molécules doivent être lancées avec une vitesse plus grande ou en plus grand nombre pendant la courte période occupée par une pulsation de décharge intermittente que pendant la décharge continue, ce qui semble résulter de ce que la quantité d'électricité dans chaque décharge individuelle représente l'électricité accumulée pendant la période qui sépare deux décharges. On constate cependant que le moulinet d'un radiomètre, quand il est employé comme électrode négative d'un tube à vide, comme dans les expériences de M. Crookes, tourne beaucoup plus vite sous l'influence d'une décharge continue que sous celle d'une décharge intermittente. En augmentant graduellement la longueur de l'étincelle d'air dans le circuit de la machine de Holtz, le mouvement du radiomètre diminue, puis cesse. Il en résulte que l'action sur le radiomètre dépend de la quantité de la décharge et non de sa tension; car l'effet d'une longue étincelle d'air est nécessairement de diminuer beaucoup la quantité d'électricité qui passe, tout en augmentant sa tension. Cependant, en dépit de la diminution de quantité, la phosphorescence devient plus brillante. On peut expliquer ce phénomène en supposant que l'effet sur le radiomètre est proportionnel à la *quantité de mouvement* (*mv*) que possèdent les particules en quittant l'électrode, tandis que la phosphorescence dé-

pend de leur *énergie* (mv^2). Ce qui signifie qu'une diminution de quantité diminue le nombre des particules quittant l'électrode, tandis que l'accroissement de tension augmente la vitesse : ce dernier accroissement est insuffisant pour empêcher la quantité de mouvement totale des particules de diminuer par l'effet de l'étincelle, mais suffisant pour augmenter notablement leur énergie totale.

Bien que la phosphorescence soit intermittente comme les autres phénomènes lumineux de la décharge sensitive, il convient de l'étudier à part. Elle ne constitue pas, comme les stries ou la lueur négative, une partie du phénomène de la décharge proprement dite ; c'est un effet de radiation mécanique qui accompagne la décharge ou une image projetée de cette radiation sur la surface du verre ; c'est un effet presque accidentel, tenant à ce fait que le verre est la substance la plus propre à faire des tubes transparents et que les substances qui entrent dans la composition du verre deviennent phosphorescentes sous l'action des courants moléculaires. C'est donc seulement un phénomène secondaire de la décharge gazeuse. Mais, de même que, dans la décharge lumineuse, on a observé des effets de détente et des effets spéciaux dus à l'interférence de la décharge principale avec des décharges artificielles de même période qu'elle, de même la phosphorescence due à la décharge principale est susceptible d'être affectée d'une façon analogue, quoique les résultats soient bien différents de ceux obtenus avec une colonne lumineuse. Et comme la phosphorescence est le plus marqué de tous les phénomènes qui accompagnent la décharge dans les vides extrêmes, il importe, en étudiant l'état sensitif dans ces vides, ainsi que la nature et les circonstances des décharges qui s'y produisent, d'accorder une attention spéciale aux phénomènes qui dépendent de la phosphorescence.

DES EFFETS DE DÉTENTE POSITIVE DANS LES TUBES TRÈS RARÉFIÉS

I. — *Phosphorescence de détente.* Dans un tube à vide modéré, traversé par un courant continu, on n'observe pas de phosphorescence ; mais, en interposant une longue étincelle d'air entre le pôle + de la machine et le tube, on voit la phosphorescence verte près de l'électrode négative. Si alors on place le doigt sur le tube, une brillante tache verte apparaît sur le côté du tube opposé au doigt ; et cela, quel que soit le point du tube touché, à l'exception du voisinage immédiat de l'électrode négative ; d'ailleurs, la tache est d'autant plus brillante que le point touché est plus rapproché de l'électrode positive. Avec des vides poussés plus loin, le phénomène se produit plus facilement, car il suffit d'une étincelle plus courte ; mais il est moins net,

car l'action de l'électrode négative rend tout l'intérieur du tube phosphorescent.

L'explication du phénomène est facile : la surface intérieure du verre au-dessous du doigt agit comme une électrode négative, sous l'influence de l'électricité positive qui vient de l'électrode +, et la décharge de détente est assez violente pour lancer des courants moléculaires capables de produire la phosphorescence sur le côté opposé du tube.

L'existence d'une décharge négative partant de l'intérieur du tube au-dessous du doigt se trouve ainsi démontrée directement, car les courants moléculaires n'accompagnent jamais qu'une décharge négative.

L'aspect de cette phosphorescence résultant de la détente montre encore qu'il n'est pas nécessaire que la décharge émane d'un corps solide pour qu'elle produise des courants moléculaires. La décharge en question vient de la surface intérieure du verre et non de l'intérieur de la masse du verre.

Le siège de l'action est à la surface limite de l'électrode, ou peut-être dans la couche de gaz qui l'environne immédiatement, et l'action s'exerce en réalité entre l'électrode solide et le gaz.

Les effets de phosphorescence par la détente peuvent être produits avec un arrangement unipolaire positif. On peut aussi les obtenir en se servant d'un tube dans lequel les électrodes sont placées très près l'une de l'autre à un même bout du tube : l'introduction d'une étincelle d'air produit dans le reste du tube une décharge lumineuse ou une nébulosité (suivant le degré du vide), qui n'est autre qu'une décharge unipolaire, sur laquelle on constate la phosphorescence par la détente.

Ce phénomène permet de déterminer expérimentalement les lois qui régissent la production des courants moléculaires et leur direction. En faisant varier la forme et la dimension de la feuille d'étain placée sur le tube, on fait varier l'électrode négative d'où partent ces courants ; par la variation de la longueur de l'étincelle d'air, on fait varier la violence de la décharge. Enfin, le côté du tube opposé à l'étain constitue un écran très bien disposé pour l'observation des effets.

Un examen sommaire montre qu'il faut rejeter l'hypothèse qui se présente la première à l'esprit, à savoir que les courants moléculaires se meuvent suivant des lignes droites normales à la surface de l'électrode. S'il en était ainsi, en effet, la forme de la tache phosphorescente, due à un morceau de feuille d'étain employé pour produire la détente, aurait une forme semblable à celle de l'étain. Or, il n'en

est pas ainsi, car on observe dans cette tache, que nous appellerons l'image phosphorescente, une distorsion qui tient à plusieurs causes.

D'abord, les courants moléculaires qui causent la phosphorescence de détente ont une direction oblique à la normale. Plaçons, en effet, autour d'un tube dans lequel passe un courant intermittent, un anneau de feuille d'étain relié à la terre, et mettons dans le tube un petit morceau de verre dans une position telle, que la ligne qui va de ce fragment de verre à un point du contour de l'anneau fasse un angle de 45° avec l'axe du tube. Le morceau de verre projette alors une ombre très nette, comme si les courants moléculaires arrivaient directement sur lui de la feuille d'étain placée sur le côté opposé du tube. La même expérience montre de plus que la phosphorescence de détente est indépendante de celle qui provient de l'électrode négative; car le morceau de verre était placé entre l'étain et l'électrode

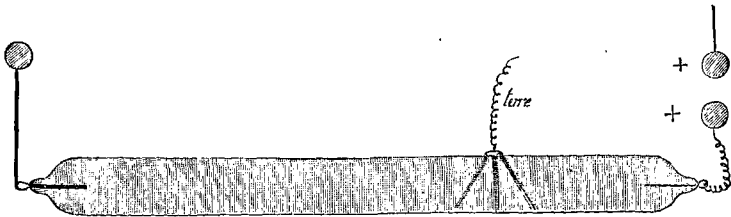


FIG. 258.

négative, en sorte que l'ombre était portée vers l'électrode négative au lieu d'émaner de celle-ci.

Si on place sur le tube un très petit morceau de feuille d'étain relié à la terre (fig. 258), on voit apparaître sur le point du tube exactement opposé une tache centrale brillante, entourée d'un anneau de faible intensité, mais très large et limité extérieurement par une ligne de phosphorescence brillante. Les courants moléculaires passent alors dans toutes les directions comprises dans un cône droit ayant son axe normal au tube et dont le demi-angle au sommet est de 20 à 30 degrés.

Si on place sur le tube, dans le sens de sa longueur, une bande étroite de feuille d'étain de 5 centimètres de long, reliée à la terre, la phosphorescence produite a la forme d'une large tache occupant à peu près la moitié de la circonférence du tube et dont l'éclat n'est pas uniforme. Une bande longitudinale mal définie et plus brillante que le reste, apparaît juste en regard de la bande d'étain; des ramifications perpendiculaires à la direction de cette bande lumineuse par-

tent de ses divers points et donnent au verre l'aspect strié [cet effet rappelle les apparences que produit la volatilisation par l'étincelle électrique d'un fil métallique fin posé sur une feuille de papier blanc]. Cette distribution de lumière ne peut pas résulter d'une simple superposition des phosphorescences produites par les éléments de surface de la bande d'étain; elle résulte de l'interférence des courants émanant de ces divers éléments. Les particules de gaz, repoussées par les éléments de la surface du verre au-dessous de la feuille d'étain, ne peuvent pas se diriger dans tous les azimuths; car, dans le sens de la longueur de la bande, se trouvent d'autres éléments également actifs qui les repoussent avec violence. Les seules directions où les courants puissent s'épanouir, sont comprises dans le plan mené normalement à la bande par l'élément considéré.

Si la bande d'étain est placée perpendiculairement à la longueur du tube et l'entoure en partie, la phosphorescence de détente offre la même apparence striée, mais les stries sont dans la direction de l'axe, et non plus perpendiculaires à l'axe comme tantôt, et la bande centrale brillante est dirigée suivant une section normale au tube. L'extension en largeur que ces stries donnent à l'image est telle que, si la bande est très courte, l'image phosphorescente paraît longue et étroite, et la direction de sa longueur fait un angle droit avec celle de la feuille d'étain. De même si la feuille d'étain est placée longitudinalement sur le tube, c'est dans le sens perpendiculaire que l'image s'étend le plus.

En plaçant plusieurs bandes d'étain dans des positions obliques, on trouve invariablement que les stries, aux points d'où elles partent, ont toujours une direction perpendiculaire à celle de la tangente à la bande d'étain. Pour avoir une preuve rigoureuse, on dispose une bande d'étain suivant une courbe telle que ses plans normaux passent par la tangente au point correspondant de l'image de la courbe, c'est-à-dire de la courbe qui se forme sur le côté opposé du tube, chaque point de cette courbe étant exactement opposé au point correspondant de la feuille d'étain. Toutes les stries doivent alors se disposer suivant la courbe formant le lieu des taches centrales de phosphorescence, et le résultat doit être une simple ligne courbe de phosphorescence brillante sans aucun épanouissement de stries transversales sur ses bords. Cette courbe est évidemment une hélice inclinée à 45 degrés. Les stries se trouvant dans un plan normal à la bande d'étain, le lieu de leurs

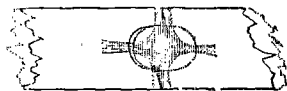


FIG. 259.

intersections consécutives doit être la *développée* de la courbe formée par la bande d'étain, et ce lieu doit être représenté par une ligne d'un éclat particulier. On a fait l'expérience avec un fil fin de cuivre, ayant la forme d'une ellipse, courbé de façon à s'appliquer sur le tube. Les quatre branches, en forme de croissants, de la développée étaient distinctement indiquées par une ligne brillante de phosphorescence (fig. 259).

Une autre cause qui empêche les courants moléculaires de produire une image parfaite du morceau de feuille d'étain est la propriété qu'ont ces courants d'interférer l'un avec l'autre dans leur passage à travers le gaz. Il est difficile de séparer cette cause de la précédente, car les courants moléculaires ne se manifestent qu'à leurs extrémités, aux points où ils frappent le verre, en sorte qu'il est impossible de distinguer directement l'obliquité initiale et celle qu'ils ont prise dans leur trajet en interférant avec d'autres courants moléculaires. On a cependant des preuves nombreuses de cette cause d'obliquité. Plaçons une petite feuille d'étain reliée à la terre en un point du tube, et à 90 degrés de celle-ci, sur la même section du tube, une seconde feuille d'étain. Si on relie celle-ci à la terre, la forme de la tache phosphorescente de la première est modifiée, et on aperçoit une seconde tache, correspondant à la seconde feuille d'étain; si on coupe la communication de la première avec la terre, la forme de la seconde tache est modifiée.

Ou encore, on entoure le tube d'une hélice de feuille d'étain, inclinée à 45 degrés et reliée à la terre : elle produit une hélice phosphorescente. On touche alors le tube en un point situé entre deux spires de l'hélice d'étain, de sorte que les courants moléculaires émanant du doigt coupent normalement la surface formée par les courants moléculaires issus de l'étain. On observe un changement distinct sur la partie correspondante de l'hélice phosphorescente.

Enfin, plaçons deux morceaux d'étain dans des positions diamétralement opposées, en sorte que chacun se trouve sur la place que doit naturellement occuper l'image phosphorescente de l'autre. Les courants moléculaires émanant de l'un d'eux semblent repousser en arrière ou dévier de côté les courants émanant de l'autre; car, à chaque morceau d'étain, on voit un morceau du verre de même forme que l'étain, mais un peu plus large, qui est totalement privé de phosphorescence. On a un exemple frappant de cet effet en plaçant autour du tube un anneau d'étain relié à la terre. On ne voit aucune phosphorescence au-dessous de l'étain, ce qui prouve que les courants moléculaires projetés normalement de la surface du verre n'ont pas atteint le côté opposé; mais de chaque côté de l'anneau d'étain et parallèle-

ment à lui, on aperçoit deux anneaux phosphorescents séparés de lui par un intervalle uniforme, variant suivant les cas de 3 à 12 millimètres.

Il ne saurait y avoir de doute sur l'identité de nature de ces courants moléculaires avec ceux qui accompagnent les courants continus. Ils donnent les ombres des objets placés dans le tube, comme les courants moléculaires émanant de l'électrode négative, même l'ombre de l'électrode positive. L'électrode négative ne peut donner lieu à une ombre proprement dite, car les courants moléculaires qu'elle émet elle-même déviaient les courants dirigés sur elle. Les ombres dues à la détente sont bien distinctes de celles dues à la décharge de l'électrode négative; car si l'objet est suffisamment voisin de celle-ci pour que son ombre se produise à la façon ordinaire, on obtiendra une seconde ombre par la phosphorescence de détente. On obtiendra de même deux ombres du même objet en plaçant deux morceaux d'étain reliés à la terre sur les côtés opposés du tube, l'un un peu plus près de l'électrode + du tube, l'autre un peu plus près de l'électrode — que l'objet, en sorte que celui-ci se trouve dans la phosphorescence de détente produite par chaque feuille d'étain : on aperçoit deux ombres obliques dans des directions opposées.

II. *Ombres virtuelles.* — Si on pose le doigt sur un tube très raréfié, traversé par une décharge avec étincelle d'air positive, la lumière verte s'affaiblit à partir du point où repose le doigt et dans la direction de l'électrode positive, produisant l'effet d'une ombre

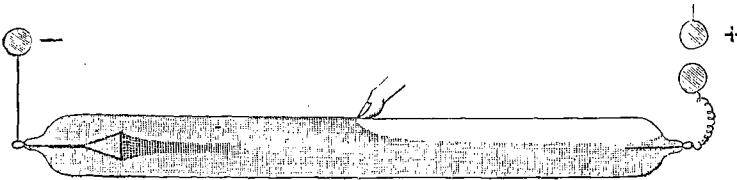


FIG. 263.

projetée sur cette partie de la surface du tube. Comme ces ombres ne proviennent pas d'un objet interposé sur le parcours des particules gazeuses, mais sont produites par un corps agissant de l'extérieur sur ces particules, les auteurs les appellent des *ombres virtuelles*. Si l'étincelle d'air est petite, la région sur laquelle l'ombre s'étend est limitée par un plan presque parallèle au plan tangent au point où repose le doigt, et à peu de distance de ce dernier; mais, avec une étincelle longue, le plan limite est très incliné sur ce plan

tangent et coupe le tube obliquement. Le contour de l'ombre virtuelle est bien défini, et il est généralement plus brillant que le reste du tube.

On sait que l'effet d'une détente en un point de la surface du tube, quand l'étincelle d'air est $+$, est de produire des décharges impulsives négatives partant de l'intérieur du tube, et on a vu que, dans les vides extrêmes, ces décharges sont accompagnées de courants moléculaires. L'effet de détente positive étant identique à l'effet spécial négatif aussi bien dans les décharges phosphorescentes que dans les décharges ordinaires, il faut conclure que les ombres virtuelles sont dues à une décharge négative émanant de l'intérieur du tube, transversalement à sa longueur; cette décharge est accompagnée d'un courant moléculaire transversal qui repousse vers le bas du tube les courants moléculaires émanant de l'électrode négative. C'est donc un effet d'interférence de courants moléculaires.

On a un fort bel exemple de ces interférences, en donnant à l'électrode négative la forme d'un cône creux (fig. 261). Les courants molé-

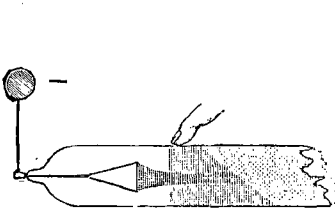


FIG. 261.

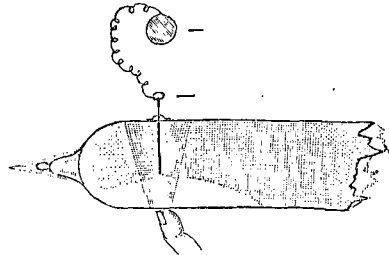


FIG. 262.

culaires qu'elle projette frappent les parois du tube à peu de distance de l'électrode, laissant une zone tout à fait privée de phosphorescence. Si on place le doigt sur cette zone sombre (à laquelle les auteurs donnent le nom de zone sensible), toute la phosphorescence du tube est modifiée. Les courants moléculaires issus du doigt, traversant le cône de courants moléculaires émanant de l'électrode négative, font que ces derniers dévient *en masse* et produisent la phosphorescence sur l'autre côté du tube.

En prenant un tube dont l'électrode négative est un fil rectiligne perpendiculaire à l'axe du tube et terminé à mi-distance de l'axe et du côté opposé, faisant traverser le tube par une décharge à longue étincelle et plaçant le doigt au point du tube situé sur le prolonge-

ment de cette électrode, la phosphorescence de détente prenait la forme d'un anneau autour de la racine de cette électrode, montrant que les courants moléculaires émanant du doigt étaient déviés de leur course et s'inclinaient sur la direction de l'électrode au lieu de lui être parallèles (fig. 262).

D'autres expériences confirment encore cette théorie. On place dans le tube un squelette de tétraèdre construit avec des fils de cuivre : en plaçant le doigt sur le tube à l'opposé de la place occupée par le tétraèdre, son ombre se projette sur la phosphorescence de détente, comme cela aurait lieu si les courants moléculaires émanaient de l'électrode négative. Si en même temps on mettait un conducteur en contact avec l'extérieur du tube au point où l'un des angles du tétraèdre touchait l'intérieur, toutes les ombres des fils se bombaient en dehors. Le conducteur envoyait en effet dans l'intérieur du tube de l'électricité négative et émettait des courants moléculaires déviant de leur trajet les courants moléculaires dus à la phosphorescence de détente, ce qui produisait la courbure des lignes d'ombre. Avec un tétraèdre en fil de verre, le phénomène cessait. Avec une étincelle d'air négative et un morceau de feuille d'étain placé au-dessus du tétraèdre et relié à l'électrode négative, de manière à avoir l'effet négatif spécial, l'ombre des fils se projetait encore sur la phosphorescence, montrant bien que l'effet est équivalent à l'effet positif de détente. Mais, en mettant un conducteur en contact avec le tube à l'un des angles du tétraèdre, les ombres ne se bombaient plus, car la détente amenait dans le tétraèdre de l'électricité positive, laquelle n'est pas accompagnée de courants moléculaires.

Plaçons encore dans un tube traversé par des décharges avec étincelle positive de petits objets phosphorescents, tels que des morceaux de verre. Si on pose le doigt sous le tube entre ces objets et l'électrode négative, les courants moléculaires de cette électrode qui passaient dans le bas du tube sont détournés par ceux émanant de dessous le doigt ; ils ne frappent plus les fragments de verre et passent complètement au-dessus d'eux : non seulement il n'y a plus d'ombre produite, mais les fragments de verre perdent leur phosphorescence.

Il faut noter que les courants moléculaires émanant de l'électrode font un très-petit angle avec les côtés du tube, en sorte qu'une très-petite déviation suffit pour produire les ombres virtuelles.

Enfin, on peut produire une double ombre virtuelle quand l'électrode négative est bifurquée. On prend un tube de Crookes (fig. 263) muni de deux électrodes extrêmes que l'on fait négatives et d'une électrode intermédiaire que l'on fait positive. En plaçant le doigt sur

le tube, on voit deux ombres qui émanent des électrodes négatives et ne sont point dirigées vers l'électrode positive.

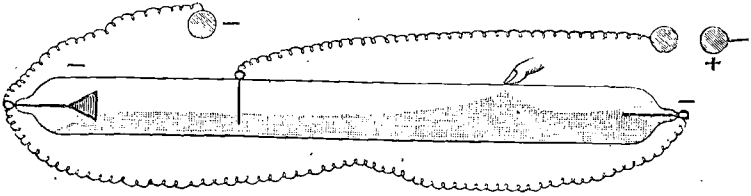


FIG. 263.

III. La luminosité positive et la phosphorescence qui l'accompagne.

— En observant un tube traversé par un courant (avec étincelle d'air positive) pendant qu'on fait le vide, on voit que la luminosité positive éprouve un changement de forme très marqué. Quand on est près du degré de vide où se manifeste la phosphorescence, la colonne positive diminue de diamètre et se réduit à un pinceau lumineux étroit très sensible à l'approche d'un conducteur; et, comme il est difficile de mettre le tube à l'abri de toutes les influences perturbatrices, cette colonne filiforme s'étend ordinairement le long du verre, sur un des côtés du tube, au lieu de rester dans l'axe. En raison de son extrême sensibilité, elle affecte souvent une forme courbe, et quelquefois fait des zigzags d'un côté du tube à l'autre.

En approchant la main ou un autre conducteur, la luminosité est repoussée sur le côté opposé du tube; et il est bon de ne pas approcher de plus de 10 ou 15 centimètres, car l'effet au contact est si

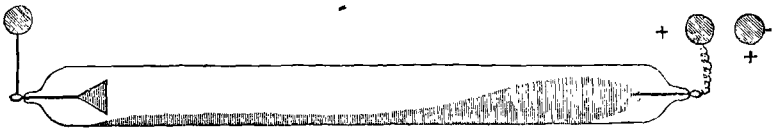


FIG. 264.

violent que le phénomène est masqué. La ligne de contact de ce pinceau lumineux avec le tube est indiquée par une longue raie de phosphorescence verte, très mobile, car elle accompagne toujours la colonne positive dans ses déplacements et ne peut en être séparée qu'en prenant des précautions spéciales. Cette raie phosphorescente se distingue bien de la phosphorescence de détente, obtenue en touchant le tube avec le doigt, par son extrême mobilité, qui se

manifeste quand on approche ensuite un autre conducteur. La décharge positive unipolaire simple ou double est un des meilleurs moyens de produire le phénomène même dans les tubes où le vide n'est pas parfait : les deux colonnes positives en forme de langue obtenues dans les vides modérés avec la décharge unipolaire double deviennent, dans les vides plus élevés, deux pinceaux longs et minces terminés en pointe et accompagnés chacun de leur phosphorescence propre.

En introduisant dans le tube de petits fragments de verre, et dirigeant sur eux la phosphorescence annexe de la luminosité +, on constate que *l'ombre de chaque objet est située dans la même section normale du tube que l'objet lui-même, c'est-à-dire dans la position qu'elle aurait si la décharge avait son siège sur le côté opposé du tube.* On en conclut que les courants moléculaires produisant cette phosphorescence annexe ne viennent pas de l'électrode négative, mais sont dus à une action locale dans le tube, et que *leur direction est normale à l'axe du tube.* La décharge positive est donc accompagnée, tout le long du tube, de décharges négatives, et les courants moléculaires qui accompagnent ces dernières partent des parois du tube dans des directions normales à l'axe, et se dirigent vers la colonne mince de luminosité positive. Celle-ci représente donc le *lieu de la cause excitatrice de cette action locale, c'est-à-dire le lieu où l'électricité positive se détend par l'effet des décharges négatives qu'elle excite sur les parois du tube.*

Plaçons un électro-aimant de telle sorte que son axe soit perpendiculaire à celui du tube, et approchons son pôle du tube, mais pas assez près pour produire la phosphorescence de détente. Observons la position de la ligne verte et faisons passer le courant dans l'électro-aimant. Aussitôt la ligne verte se tord en forme de S. C'est en effet ce qui doit se passer, si les courants moléculaires qui produisent la phosphorescence annexe sont dirigés normalement à l'axe du tube, c'est-à-dire parallèlement à l'axe de l'aimant : ces courants doivent se courber en hélice, ceux d'un côté tournant dans un sens et ceux de l'autre en sens contraire. On vérifie expérimentalement que tel serait l'effet produit sur des courants moléculaires, constitués comme on vient de le dire, en entourant le tube d'une large bande d'étain, de façon à laisser seulement une fente longitudinale : en reliant la bande à la terre, cette ouverture devient phosphorescente par la détente, et les courants produisant cette phosphorescence ont la direction que nous croyons être celle des courants produisant la phosphorescence annexe. En approchant un électro-aimant, on reproduit l'effet observé dans l'expérience précédente.

Il est possible de séparer légèrement la luminosité positive de sa
CORDON. Electricité. II. — 19

phosphorescence annexe par l'approche d'un conducteur : si on approche un fil rectiligne relié à la terre et faisant un certain angle avec l'axe du tube, la ligne verte se contourne en serpent et coupe la luminosité positive à son point d'inflexion.

La trace marquée par la luminosité positive est donc une preuve de l'intensité de l'appel local d'électricité négative : la coexistence de ce fait avec les courants de molécules émanant de l'électrode négative et dirigés le long de cette luminosité peut paraître paradoxale ; mais il faut remarquer que rien ne prouve que ces molécules soient des véhicules de l'électricité négative.

DE L'EFFET SPÉCIAL POSITIF DANS LES TUBES TRÈS RARÉFIÉS

La particularité qui caractérise l'effet positif dans les tubes à vide modéré, c'est que la luminosité est attirée au lieu d'être repoussée, et que, si un fil relié à l'électrode positive est placé près du tube parallèlement à sa longueur, une ligne lumineuse apparaît en regard du fil sur le côté du tube le plus rapproché.

Dans les vides extrêmes, le même effet se produit : la colonne filiforme, dont nous avons parlé, est attirée et suit tous les mouvements du fil. Cependant, si le fil relié à l'électrode positive est très rapproché du tube, l'attraction se change en répulsion (fig. 265) ; ce phénomène se produit aussi dans les tubes moins raréfiés et s'explique comme il

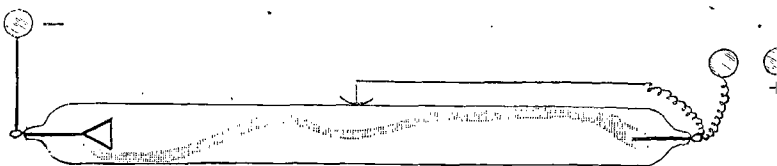


FIG. 265.

suit : quand le corps qui produit l'effet spécial est très près du tube, la décharge positive qu'il provoque se précipite vers l'électrode négative, et la luminosité positive qui s'étend vers l'électrode positive éprouve une dépression, parce qu'il se forme un espace obscur imparfait au-dessous du fil ou de l'étain : quand cette dépression est symétrique tout autour du tube, la colonne positive devient la colonne centrale mince qui se prolonge jusqu'à la terminaison de la portion tronquée. Le phénomène s'explique de la même manière dans les vides extrêmes ; seulement, comme, dans ce dernier cas, l'espace

obscur négatif est plus large, cette répulsion de la colonne positive est encore plus marquée. L'exactitude de cette interprétation n'est pas douteuse ; car, en produisant l'effet spécial avec un anneau d'étain, on retrouve le phénomène bien connu de la colonne tronquée positive.

Ainsi, l'effet positif spécial fait que la luminosité positive se localise elle-même du côté du tube le long duquel se trouve le fil relié à l'électrode +. On sait d'autre part qu'il y a une décharge constante d'électricité négative entre cette luminosité + et les parois du tube voisines. Il en résulte que l'effet positif spécial doit être marqué par une phosphorescence sur le côté où se produit cet effet spécial et non pas, comme dans la détente positive, sur le côté opposé du tube : c'est ce que l'expérience vérifie, la colonne lumineuse filiforme qui apparaît le long du tube, du côté du fil, est accompagnée de sa phosphorescence annexe.

DE L'EFFET DE DÉTENTE ET DE L'EFFET SPÉCIAL NÉGATIFS DANS LES TUBES TRÈS RARÉFIÉS

On sait que la particularité principale qui distingue les décharges dans les vides extrêmes de celles dans les vides modérés est la prédominance de la caractéristique spéciale de la décharge négative, c'est-à-dire les courants moléculaires, et l'insignifiance relative de la caractéristique spéciale de la décharge positive, c'est-à-dire la luminosité positive. Aussi, dans les recherches sur les tubes à vide modéré, on doit s'appuyer surtout sur les effets des décharges positives, qui sont très nets, et, dans celles sur les vides extrêmes, on doit être guidé surtout par les décharges négatives.

Il en résulte que la détente négative est un sujet peu intéressant, car les décharges impulsives sont alors positives, par suite peu visibles. On observe les mêmes apparences que sur l'effet spécial positif, avec cette différence que la colonne lumineuse filiforme est remplacée par une nébulosité diffuse. Enfin, l'effet spécial négatif est identique à la détente positive : on retrouve les ombres virtuelles et la phosphorescence sur le côté opposé du tube.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES RELATIVES A LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE

I. *Grandeur relative de durée des phénomènes de la décharge.* — La décharge électrique s'effectue dans un temps très court ; toutefois, les phénomènes qui la composent n'ont pas la même instanta-

néité. Les petites quantités de temps qui entrent dans la décharge sont les suivantes :

1. Temps occupé par une décharge.
2. Intervalle de deux décharges.
3. Durée d'émission de la décharge d'électricité positive par son électrode.
4. Durée d'émission de la décharge d'électricité négative par son électrode.
5. Temps que mettent les courants moléculaires à quitter une électrode négative.
6. Temps que met l'électricité positive à passer le long du tube.
7. Temps que met l'électricité négative à passer le long du tube.
8. Temps que mettent les particules composant les courants moléculaires à passer le long du tube.
9. Temps que met l'électricité à passer le long d'un fil métallique de longueur égale à celle du tube.

On considère comme nul, ou comme négligeable par rapport aux quantités énumérées, le temps que met l'induction électrique à traverser un espace fini, car il a été impossible de lui découvrir un symptôme de durée.

D'abord, l'intervalle de deux décharges est incomparablement plus grand que toute autre des quantités de temps énumérées. C'est ce qu'on démontre par le miroir tournant (p. 224). La durée d'une étincelle dans l'air est infiniment petite, car si vite qu'on fasse tourner une roue, elle semble au repos quand elle est éclairée par une étincelle électrique. La durée d'une décharge dans un tube à vide doit être du même ordre, car ce sont des phénomènes de même nature. Quoique l'intervalle de deux des décharges que nous considérons ne dépasse pas $\frac{1}{1000}$ de seconde, il est néanmoins infiniment plus grand que la durée de la décharge, et c'est ce qui a permis d'isoler dans notre étude les décharges individuelles.

Quant à la durée de la décharge complète, elle est la somme d'un certain nombre d'autres quantités de temps représentant les durées des phénomènes qui la composent.

Le temps que mettent les électricités + et — à passer le long du tube est l'intervalle qui s'écoule entre l'instant de leur émission par une électrode et l'instant de leur arrivée à un point voisin de l'électrode opposée. On trouve que *le temps occupé par le passage de l'une ou l'autre électricité le long du tube est d'un ordre de grandeur bien plus élevé que celui nécessaire pour qu'elle passe le long d'un fil métallique de même longueur.*

C'est ce que prouvent les expériences citées page 233, où deux

feuilles d'étain reliées par un fil sont placées respectivement près des électrodes, car la plus voisine de l'électrode de l'étincelle produit une détente aussi grande que si l'autre ne touchait pas le tube, et celle-ci produit un effet spécial, par suite des impulsions positives qu'elle reçoit de la première. Il est très probable que les deux électricités + et — ont la même vitesse dans le tube.

On a parlé, en effet, page 232, d'expériences faites avec une petite bobine, prouvant qu'il y avait au milieu du tube une zone neutre, quand les deux électrodes étaient dans les mêmes conditions, et qu'on pouvait déplacer la position de cette zone neutre en suspendant un petit condensateur à l'électrode dont on voulait retarder la décharge.

Vient ensuite la comparaison des temps que mettent les décharges à passer le long du tube avec les temps qu'occupent leurs émissions par les électrodes. La durée d'émission d'une décharge est difficile à définir ; car cette durée dépend de la quantité de la décharge et du degré de vide. On a une indication par le contraste de l'expérience précédente, qui prouve que les deux électricités se déchargent avec la même vitesse, et d'une autre expérience dont nous allons parler, qui prouve que l'électricité positive se décharge plus vite. La différence tient probablement à ce que dans le premier cas les décharges sont moins violentes et le vide plus modéré, tandis que dans le second, les décharges sont assez violentes pour produire la phosphorescence. Quant au temps que mettent les courants moléculaires à quitter l'électrode négative, il doit être du même ordre que la durée d'émission de la décharge négative

Pour comparer les durées d'émission des deux décharges, les auteurs commencent par démontrer que *le temps occupé par la décharge négative est plus grand que le temps nécessaire aux particules composant les courants moléculaires pour parcourir la longueur du tube, mais lui est comparable*. Ils s'appuient sur les phénomènes d'interférence des courants moléculaires auxquels sont dues les ombres virtuelles. Si on produit une détente dans une portion du tube voisine de l'électrode positive, les courants moléculaires qui en résultent dévient ceux partant de l'électrode négative. Donc, la décharge négative produite par la détente dure encore au moment où les molécules, venant de l'électrode négative du tube, arrivent au point du tube où on a fait la détente.

Puis ils font voir que *le temps mis par l'une ou l'autre espèce d'électricité à passer le long du tube est incomparablement plus court que celui occupé par l'émission de ces courants moléculaires, ou, (ce qui est la même chose) que le temps occupé par la décharge négative*.

C'est ce que démontre l'expérience suivante : si une feuille d'étain est placée près de l'électrode positive d'un tube traversé par une décharge à étincelle positive, et reliée à une autre feuille semblable près de l'électrode négative, on constate l'effet positif de détente à la première et l'effet spécial à la seconde. L'effet de détente n'est pas augmenté en soulevant la seconde de dessus le tube et l'éloignant autant que possible de celui-ci, tout en la laissant à la même distance de la première. Mais si le vide est poussé assez loin pour que le système de détente produise la phosphorescence quand la seconde feuille est écartée du tube, on trouve que la phosphorescence disparaît quand la seconde feuille et le fil de communication avec la première sont de nouveau replacés sur le tube. Ce phénomène s'explique si la décharge électrique peut passer d'un bout à l'autre du tube dans un temps bien plus court que celui nécessaire pour que la décharge négative de détente, ou les courants moléculaires qui l'accompagnent, quitte sa source. L'électricité positive, en arrivant à la première feuille d'étain, attire l'électricité négative de l'autre feuille, et cette électricité — arrive à la première feuille par le fil, avant que la décharge $+$ ait atteint la seconde. D'où résulte la formation d'un *espace blanc* (ou espace obscur) au-dessous de la première et d'une luminosité positive au-dessous de la seconde. Mais si la décharge positive du tube arrive à la seconde feuille avant que la décharge — de détente ait quitté la première, son arrivée rappellera dans la seconde feuille l'électricité — qu'elle avait envoyée dans la première, et renverra à la première une impulsion $+$, laquelle neutralisera la tension qui sans cela eût produit une décharge — avec les courants moléculaires qui l'accompagnent.

Les auteurs ont été conduits alors à examiner les périodes de temps nécessaires à la formation de la luminosité positive et de l'espace blanc corrélatif, lesquels constituent en réalité deux parties du même phénomène, car l'espace blanc commence où finit la luminosité positive. On arrive ainsi à l'un des problèmes les plus difficiles de la décharge électrique, et dont la solution seule peut révéler les secrets de son mécanisme : le contraste de la luminosité positive et de l'espace blanc négatif forme en effet la partie la plus importante de cette dissymétrie électrique, sur l'étude de laquelle on compte surtout pour éclaircir la nature de l'électricité. Sans être encore en état de traiter cette question d'une façon satisfaisante, voici quelques faits qui apporteront un peu de lumière sur ce sujet.

D'abord, il est très vraisemblable que la production de la luminosité positive occupe la même période de temps que l'émission de la décharge qui la produit.

La production de l'effet positif spécial dans les tubes à haute tension prouve la rapidité avec laquelle l'électricité positive quitte sa source de production. On a noté (p. 290, fig. 265) le grand contour que fait la colonne positive filiforme pour éviter le point où se produit l'effet positif spécial. Il a pour cause l'électricité négative laissée sur ce point par la décharge $+$ résultant des impulsions $+$ dans l'étain. La paroi du tube située au-dessous de l'étain agit en quelque sorte comme une électrode $-$, montrant que l'électricité $+$ a déjà quitté ce point au moment où la décharge positive qui s'avance le long du tube arrive à l'étain, ce qui a permis à l'électricité $-$ de produire son effet. Ainsi le temps que met une décharge positive à quitter sa source est plus court que celui que met l'électricité positive, et sans doute aussi la luminosité positive, à passer le long du tube.

(C'est l'extrême rapidité de la décharge et de sa propagation qui doit être cause que l'on constate tant de luminosité et si peu de chaleur dans les décharges dans le vide. L'expérience montre que la température des stries ne dépasse pas 100 degrés. Mais les mesures de température ne donnent qu'une moyenne, et ce résultat n'est pas incompatible avec l'hypothèse d'une chaleur intense développée pendant une petite fraction de la période totale, ce qui expliquerait qu'une si grande proportion de l'énergie imprimée au gaz se consomme dans le passage à l'état lumineux, d'autant que la proportion des rayons très réfringibles aux rayons moins réfringibles augmente avec la température.)

Rien jusqu'ici ne peut nous faire supposer qu'il existe une différence de durée entre l'émission de l'électricité et la formation des phénomènes lumineux qui l'accompagnent. Mais une difficulté se présente en ce qui concerne le phénomène corrélatif pour la décharge négative, c'est-à-dire l'espace blanc. Il doit se former dans le même temps que la luminosité positive qu'il limite; mais comme la décharge négative n'a pas lieu avec une rapidité comparable à celle de la décharge positive, on ne peut pas regarder la formation de l'espace blanc comme s'effectuant dans le même temps que la décharge négative. Ou bien, il doit se former au début de la décharge négative, et alors, malgré le caractère de durée de cette dernière, ne pas prendre plus de temps que l'émission de la décharge positive; ou bien, il doit son existence, non pas à la décharge, mais à ce qu'on peut appeler un état de tendance à la décharge, c'est-à-dire la présence d'une certaine quantité d'électricité négative ayant une grande tendance à se décharger, mais obligée par sa nature à se dissiper lentement.

Les deux hypothèses ne s'excluent pas et sont probablement vraies

toutes les deux. Les auteurs pensent que l'espace blanc représente un espace suffisamment voisin d'une source de décharge négative pour qu'il ne s'y produise point l'action particulière qui est la cause de la luminosité positive. Son existence entre les stries consécutives et autour de l'électrode négative montre que c'est *un espace dans lequel peut s'effectuer sans production de luminosité une opération équivalente dans ses résultats au passage de l'électricité*, car il coupe la luminosité en segments bien détachés les uns des autres.

La conclusion importante à tirer de ce qui précède est qu'il n'y a pas de raison pour considérer la formation de cet espace blanc comme un phénomène relié à l'émission des courants moléculaires. Ces derniers ont un caractère marqué de durée, tandis que le premier est au moins de l'ordre d'instantanéité du passage de l'électricité le long du tube, puisqu'il modifie la luminosité positive qui accompagne ce passage, et apparaît dès qu'on forme des décharges négatives impulsives sur le côté d'un tube.

On pourra objecter cependant qu'on peut amener la luminosité positive très près de l'électrode négative, en empêchant avec un aimant les courants moléculaires de passer au fond du tube, comme si ces derniers repoussaient la colonne de luminosité avant d'être déviés. Mais les auteurs pensent que ce n'est là qu'une apparence, d'autant qu'on observe le même effet dans les tubes à vide modéré, où il ne peut être question de courants moléculaires; et cette apparence tient à l'effet produit sur l'imagination par la vue de ce qu'on désigne généralement par l'espace obscur négatif : il semble que cet espace sépare la région de l'électrode négative de celle de l'électrode positive, et on est porté à attribuer à une modification de l'action de l'électrode négative toute modification survenue dans cet espace. Mais on a vu, p. 222, qu'en réalité, la région de l'électrode négative est limitée par la lueur négative, laquelle est séparée de l'électrode par un espace blanc qui est l'espace de Crookes, et que l'espace obscur négatif est seulement l'espace blanc de l'unité physique qui vient après. Il en résulte que si la luminosité paraît se rapprocher de l'électrode négative, c'est par suite de la modification que subit la longueur de cet espace blanc, d'une étendue exceptionnelle, quand les circonstances de la décharge sont modifiées.

En résumé, les diverses quantités de temps sont rangées par les auteurs dans l'ordre suivant de grandeur décroissante :

- A. Intervalle entre deux décharges.
- B. Durée de l'émission de la décharge de l'électricité négative par son électrode.

Temps que mettent les courants moléculaires à quitter une électrode négative.

Temps que mettent les particules composant les courants moléculaires à passer le long du tube.

C. Temps que met l'électricité positive à passer le long du tube.

Temps que met l'électricité négative à passer le long du tube.

D. Durée d'émission de la décharge positive.

Temps nécessaire pour la formation de la luminosité positive au siège de la décharge positive.

Temps nécessaire pour la formation de l'espace blanc au siège de la décharge négative.

E. Temps que met chaque espèce d'électricité à passer le long d'un fil métallique de même longueur que le tube.

La période occupée par la décharge entière doit être de l'ordre B, puisqu'elle comprend une décharge négative complète.

II. *Différence dans la durée des décharges positive et négative.*

— L'émission de la décharge négative prend plus de temps que celle de la décharge positive, que l'électrode soit une électrode formée sur le verre par une action de détente, ou spéciale, ou que ce soit l'électrode réelle du tube. Les auteurs démontrent que le caractère de durée de la décharge négative, comparé à celui de la décharge positive, augmente avec le degré de raréfaction et devient très marqué dans les vides extrêmes. Ce caractère de la décharge négative a déjà été signalé par MM. de la Rue et Müller (p. 171); son existence n'a été rigoureusement démontrée que dans les tubes où le vide a été poussé assez loin pour obtenir des ombres virtuelles, mais les faits suivants font penser qu'il doit en être de même dans les vides plus modérés. Ainsi, tous les phénomènes d'intermittence positive sont plus nets que ceux d'intermittence négative, ce qui indique que la décharge négative est moins instantanée. De plus, on a remarqué depuis longtemps que la décharge négative se fait plus facilement par une surface que par une pointe, ce qui montre qu'elle est plus continue et qu'elle est facilitée quand elle peut s'effectuer simultanément par un grand nombre de points.

Quoi qu'il en soit, ce caractère de durée s'accroît avec le degré de raréfaction.

III. *De la colonne positive.* — Les auteurs citent des expériences avec le tube-étalon, montrant que la luminosité est l'indice de la présence d'électricité positive libre et d'un appel local d'électricité négative. On prend un tube muni de deux électrodes extrêmes et d'une électrode intermédiaire très rapprochée de l'une des deux autres : on relie les deux électrodes voisines aux pôles de la machine, en sorte que

le courant n'ait à traverser que la petite longueur de tube qui les sépare. En introduisant une étincelle d'air, il se forme une languette pointue de luminosité positive qui s'avance vers la troisième électrode, dans la partie inoccupée du tube, pour constituer une décharge unipolaire. On relie cette troisième électrode à l'anneau d'étain d'un tube étalon, et on n'observe aucun effet jusqu'au moment où l'étincelle est assez longue pour que la luminosité unipolaire arrive à l'électrode et forme autour d'elle l'espace blanc usuel. Aussitôt les effets positifs se manifestent dans le tube étalon. Si on diminue l'étincelle, ils cessent dès que la luminosité unipolaire quitte l'électrode. Ainsi, l'effet de l'électricité libre déchargée dans le tube est tellement local, qu'elle n'exerce son influence sur l'électrode que lorsqu'elle n'en est plus séparée que par l'espace blanc.

Ce phénomène, qui confirme nos idées sur la signification de l'espace blanc, montre encore que le champ électrique effectif est limité par la colonne positive, plus une couche enveloppante de la largeur d'un espace blanc : le reste du tube ne sert pas à la décharge.

Dans un tube assez raréfié, on plaçait une spirale métallique : la colonne positive remplissait la section du tube, en sorte que la spirale baignait, pour ainsi dire, dans la luminosité. Dès qu'on touchait avec le doigt la paroi du tube en un point où le tube touchait la spirale, le fil de celle-ci paraissait entouré d'un espace blanc en tous les points de contact avec la luminosité positive, ce qui montre que partout où il y a luminosité, il y a un appel d'électricité négative, déterminant la formation d'un espace blanc.

L'existence de la décharge négative étant révélée par l'espace blanc, on ne peut étendre la conclusion au cas où il n'y a plus de luminosité limitant cet espace. Mais dans les vides extrêmes on a un autre moyen, car la décharge négative est alors accompagnée de courants moléculaires : en projetant la phosphorescence de détente sur le conducteur placé dans le tube, on reconnaît la décharge négative, sans luminosité visible, en ce que les ombres se bombent. On a vu que la colonne positive filiforme dans les vides extrêmes indiquait, par la phosphorescence qui l'accompagne, la présence locale d'un appel très intense d'électricité négative, et on a assimilé la colonne positive à une ligne de centres de décharge positive.

Ceci explique encore la signification de l'espace blanc qui entoure les centres de décharge négative. Il définit l'espace dans lequel l'influence qu'exerce le centre de décharge négative empêche la continuation de cet appel intense d'électricité négative, qui est la condition d'existence de la luminosité positive dans ce milieu gazeux particulier. Les espaces blancs entre les stries sont ceux protégés du besoin

intense d'électricité négative par l'influence de l'électrode gazeuse négative formée par la surface creuse nébuleuse de la strie voisine.

On a vu encore (p. 290), que si l'on place près du tube et le long de sa surface un fil relié à l'électrode $+$, l'étincelle étant aussi $+$, la luminosité positive, ou le lieu des centres d'excitation, était attirée sur la paroi du tube voisine du fil. Or, l'effet du fil est d'exciter des décharges positives de la paroi du tube vers l'intérieur : le résultat est donc de déplacer le lieu primitif de ces décharges jusqu'à ce qu'il coïncide avec le nouveau lieu. Ainsi la création d'un nouveau lieu a rendu le premier inutile; en d'autres termes, la décharge n'exige pas de série spéciale de centres positifs de décharge le long de son parcours, elle se contente d'une seule série, mais il lui en faut une.

IV. *Courants moléculaires.* — Les auteurs, comme on l'a vu, ne pensent pas qu'il y ait de différence essentielle entre les courants moléculaires de particules de gaz, qui produisent la phosphorescence, et la projection par l'électrode négative de petites particules libres de matière conductrice dans les milieux raréfiés. Pour le prouver, on prend un tube convenablement raréfié contenant un peu d'un mélange de sable et de noir de fumée, le sable ayant pour objet d'empêcher l'adhérence du noir de fumée avec les parois du tube. On place le tube verticalement avec son électrode négative en bas, et on fait passer le courant d'une grande machine de Holtz à douze plateaux. En quelques secondes, les parois du tube sont recouvertes d'une couche de noir de fumée sur les deux tiers de la longueur. On variait l'expérience en introduisant une étincelle d'air dans la partie $+$ ou $-$ du circuit; l'effet était le même dans les deux cas et la projection si violente qu'il se formait une croûte en certains points. On a examiné alors si ces décharges présentaient les effets sensitifs observés dans la phosphorescence. Un anneau étroit de feuille d'étain a été placé autour du tube en son milieu et relié à la terre; puis on a fait passer pendant un instant très court une décharge d'intermittence positive. Les parois du tube ont été recouvertes de la couche ordinaire de noir de fumée, sauf à l'endroit où se trouvait la feuille d'étain. Ainsi les courants moléculaires de détente émanant de dessous la feuille d'étain ont détourné les particules de noir de fumée, qui sans cela se seraient portées sur cette partie du tube.

Pour vérifier que c'était bien là un effet électrique et non un effet dû à ce que l'anneau placé autour du tube amortissait la vibration ou produisait quelque autre effet mécanique, on coupa la communication de l'anneau d'étain avec le système de détente, puis on mit à la place un anneau de caoutchouc. Dans les deux cas, on n'observa plus le changement obtenu dans la couche de noir de fumée.

Enfin on joint métalliquement la feuille d'étain à l'électrode positive pour produire l'effet spécial. L'épaisseur du dépôt augmenta sous la feuille d'étain, phénomène correspondant à l'apparition de la phosphorescence sur l'étain. La détente négative produit le même effet, tandis que par l'effet spécial négatif, le noir de fumée ne se déposait pas au-dessous de l'étain. Ainsi, dans ces quatre cas, les courants de noir de fumée se comportent comme les courants moléculaires. (La durée de la décharge doit être très courte, sans cela toute la surface aurait une tendance à rester recouverte.)

Puisque de petites particules conductrices peuvent, sous l'action d'une décharge négative, produire des courants moléculaires analogues à ceux d'où résulte la phosphorescence, on est conduit à se demander si les courants moléculaires remplissent réellement une fonction électrique dans la décharge, ou si les particules de gaz sont simplement projetées comme le sont celles de noir de fumée. Sans résoudre encore cette question, on remarquera que rien n'indique que les courants moléculaires ont une fonction électrique dans la décharge, tandis que certains faits tendent à faire supposer le contraire.

Ainsi ni le téléphone, ni le tube-étalon ne révèlent leur existence. Une feuille d'étain ne produit pas un son plus fort dans le téléphone, ni un effet plus grand sur le tube étalon, parce qu'on la place sur un point où se trouve une phosphorescence brillante. On n'observe pas de différence, que la feuille d'étain soit située ou non dans une ombre absolue ou virtuelle, qui la protège cependant contre le choc de ces courants.

Il est probable de plus que la décharge négative les laisse derrière elle quand elle passe dans le tube : le temps qu'ils mettent à passer le long du tube est de même ordre que celui de l'émission de la décharge qui les produit ; mais le temps que met la décharge à passer le long du tube est plus petit ; car, quand l'intermittence est négative, la décharge traverse le tube assez vite pour arrêter la production de la phosphorescence sur une feuille d'étain voisine de l'électrode $+$ et reliée à une feuille voisine de l'électrode $-$. Ainsi la décharge projette les courants moléculaires, mais sa propagation ne dépend pas d'eux.

La décharge s'effectue soit par le passage de l'électricité $+$ le long du tube et sa rencontre avec la réponse de l'électrode $-$, soit par le passage de l'électricité $-$ et sa rencontre avec la réponse de l'électrode $+$. En supposant que les courants moléculaires soient des véhicules de la décharge ou qu'ils jouent un rôle spécial dans sa propagation, il est difficile de comprendre le premier de ces modes de décharge. De plus, il est admis qu'il n'est pas indispensable qu'un

de ces courants moléculaires frappe l'électrode positive ou même passe près d'elle, ce qui rend également incompréhensible, dans la même hypothèse, le second mode de décharge.

L'hypothèse la plus séduisante est qu'ils ont un rôle au début de la décharge, consistant à lui permettre de pénétrer dans le milieu gazeux, où elle se propage alors indépendamment de ces courants moléculaires. Ces courants seraient alors un phénomène nécessairement connexe de la décharge, mais sans action sur sa propagation. Les auteurs ne sont pas en mesure de se prononcer sur cette hypothèse. Le fait que la résistance du tube croît avec le degré de raréfaction, quand on a dépassé un certain point, s'expliquerait alors par le manque de véhicules pour transporter l'électricité dans le milieu gazeux. Mais cet accroissement de résistance peut tenir à d'autres causes.

En résumé, les auteurs doutent si les courants moléculaires ont un rôle nécessaire dans la décharge. La négative n'implique pas d'ailleurs que les molécules qui les composent ne soient pas chargées. Il est probable qu'elles le sont; sinon, il serait difficile d'expliquer la vitesse avec laquelle elles sont lancées et leur propriété d'obéir à l'aimant. Mais le fait qu'elles transportent par convection une petite portion de la décharge négative le long du tube n'implique, pas plus pour elles que pour les particules de noir de fumée, qu'elles aient une fonction à remplir dans la décharge.

CHAPITRE XXXVIII

ÉLECTROLYSE

DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE

Si un composé binaire à l'état liquide est traversé par un courant électrique, il est en général décomposé en deux éléments constituants, dont l'un apparaît à l'endroit où le courant pénètre dans le liquide, et l'autre à l'endroit où le courant sort du liquide.

Si deux fils de platine sont plongés dans de l'eau acidulée, et s'ils sont reliés à une pile, l'eau est décomposée ; l'hydrogène apparaît au pôle négatif, l'oxygène au pôle positif, et le volume de l'hydrogène produit est toujours double de celui de l'oxygène.

Si on substitue à l'eau acidulée une solution de sulfate de cuivre, par exemple, le cuivre se dépose au pôle négatif et l'acide sulfurique est mis en liberté au pôle positif.

NOMENCLATURE DE FARADAY (1)

L'opération par laquelle on résout les corps composés en leurs éléments constituants s'appelle *électrolyse*. Les corps soumis à ce traitement sont appelés *électrolytes*. Les pôles où s'opère la décomposition sont les *électrodes*. L'électrode reliée au zinc de la pile est la *cathode* ; l'autre, l'*anode*. Les produits de la décomposition s'ap-

(1) *Exp. Res.*, 665, vol. I, p. 197.

pellent des *ions* ; ceux qui vont à l'anode sont des *anions*, et ceux qui vont sur la cathode des *cations*.

Ainsi, le chlorure de plomb est un *électrolyte*, et quand il est *électrolysé*, en faisant plonger dans sa masse les *électrodes* d'une pile, les deux *ions* sont mis en liberté, savoir le chlore (*anion*) et le plomb (*cation*).

LOIS DE L'ÉLECTROLYSE (1)

Un corps simple ne peut pas être un électrolyte.

Car, par définition, un corps simple est un corps qui ne peut pas se résoudre en deux éléments constituants.

L'électrolyse ne se produit pas lorsque le corps est à l'état liquide.

La libre mobilité des particules est une condition nécessaire de l'électrolyse, car cette opération ne peut se faire que de l'une des deux façons suivantes.

La molécule voisine d'une des électrodes est décomposée. Un de ses éléments se rend à l'électrode voisine, et l'autre *ou bien* arrive à l'autre électrode, *ou bien* se combine avec un des éléments de la molécule la plus rapprochée, mettant en liberté une portion de celle-ci semblable et égale à lui-même ; cette portion à son tour se combine avec la portion correspondante de la molécule voisine et ainsi de suite. Dans les deux cas, la libre mobilité des particules est une condition essentielle.

Cependant, l'électrolyse se manifeste quelquefois dans les solides visqueux ; mais seulement en proportion de leur fluidité. Le nitre fondu est un excellent conducteur à l'état liquide. Néanmoins, si l'on plonge dans ce sel en fusion un fil de platine froid relié à une pile, l'électrolyse ne com-

(1) Voir *Chemistry*, de Miller, 4^e édition, vol. I, p. 516.

mence que lorsque la croûte de nitre solide, qui s'est formée autour du fil froid, a eu le temps de fondre de nouveau.

Le professeur Maxwell (1) dit à ce sujet :

« Clausius (2), qui a beaucoup étudié la théorie de l'agitation moléculaire des corps, suppose que les molécules de tous les corps sont dans un état d'agitation constante, mais que dans les corps solides chaque molécule ne dépasse jamais une certaine distance de sa position primitive, tandis que, dans les fluides, une molécule, après s'être éloignée à une certaine distance de sa position primitive, est tout aussi libre de s'éloigner encore davantage que de revenir en arrière. Il en résulte que les molécules d'un fluide en repos apparent changent continuellement leurs positions, et passent sans aucune régularité d'une partie du fluide à l'autre. Dans un fluide composé, Clausius suppose que non seulement les molécules composées se déplacent de cette façon, mais que, dans les collisions qui se produisent entre les molécules composées, les molécules dont elles sont composées sont souvent séparées et changent de partenaires, en sorte que le même atome individuel est à un certain moment associé avec un atome d'une espèce opposée, et à un autre moment avec un autre atome.

» Clausius suppose que cette manière d'être existe dans les liquides en tout temps ; mais lorsqu'une force électromotrice agit sur le liquide, les mouvements des molécules, qui auparavant avaient lieu indifféremment dans toutes les directions, sont maintenant influencés par la force électromotrice ; en sorte que les molécules chargées positivement ont maintenant une tendance plus grande à se diriger vers

(1) *Electricity*, de Maxwell, 256, vol. I, p. 509.

(2) *Pogg. Ann. Bd.*, Cl., S. 338 (1857).

la cathode que vers l'anode, et que les molécules chargées négativement ont une tendance plus grande à se mouvoir dans la direction opposée. Par conséquent, les molécules de la cation, dans leurs intervalles de liberté, se précipiteront vers la cathode; mais elles seront continuellement arrêtées dans leur course, parce qu'elles s'accouplent pour un moment avec les molécules de l'anion, qui se précipitent aussi à travers la masse, mais dans la direction contraire. »

La direction des molécules est toujours la même par rapport à la direction du courant de la pile. Pour montrer la direction définie de la force électrolytique, feu le docteur W. A. Miller a imaginé l'expérience suivante, qui est très instructive (1) :

« Plaçons, dit-il, à côté l'un de l'autre quatre verres, comme le représente la figure 266 : chacun d'eux est divisé en deux compartiments par une cloison de carton ou

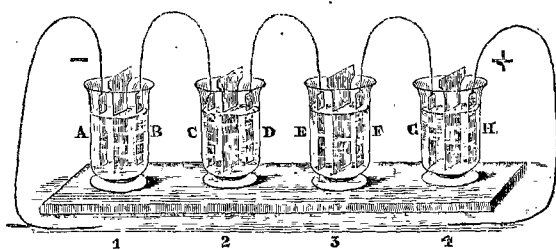


FIG. 266.

formée de trois ou quatre doubles de papier buvard; les verres sont mis en communication électrique l'un avec l'autre au moyen de fils de platine terminés par une petite feuille de platine. On met dans le verre n° 1 une solution

(1) *Elem. Chem.*, de Miller, vol. I, p. 517.

d'iodure de potassium avec de l'amidon; dans le n° 2, une solution concentrée de sel de cuisine, colorée en bleu avec du sulfate d'indigo; dans le n° 3, une solution de sulfate d'ammoniaque, colorée en bleu avec une infusion neutre de chou rouge; et, dans le n° 4, une solution de sulfate de cuivre. Relions la plaque II à l'électrode positive de la pile, et complétons le circuit par la plaque A, reliée à l'électrode négative de la pile. Dans ces conditions, l'iode libre se porte rapidement en B et forme un iodure d'amidon bleu; le chlore apparaît en D et blanchit le liquide bleu; l'acide sulfurique apparaît en F et rougit l'infusion de chou; l'acide sulfurique est aussi en liberté en H, comme on peut s'en assurer en introduisant un morceau de papier de tournesol bleu, qui rougit immédiatement; tandis qu'un morceau de papier de curcuma tourne au noir en A, par la potasse mise en liberté; qu'il en est, de même, en C, par la présence de la soude; en E, l'infusion bleue de chou devient verte par l'ammoniaque dégagée; et en G, du cuivre métallique se dépose sur la feuille de platine. »

Pour une quantité constante d'électricité, quel que soit le conducteur soumis à la décomposition (eau, solutions salines, acides, corps fondus, etc.), la quantité d'action électro-chimique est une quantité constante, c'est-à-dire que la même quantité d'électricité produit toujours la même somme d'effet chimique (1).

Le même courant électrolyse des quantités différentes de substances différentes, mais la proportion des quantités électrolysées dépend *seulement* des équivalents chimiques des substances. Ainsi, si le courant d'une pile traverse une

(1) *Exp. Res.*, de Faraday, 505, vol. I, p. 145.

série de vases contenant respectivement les substances suivantes ; eau (H^2O), iodure de plomb fondu (PbI^2), chlorure d'étain fondu ($SnCl^2$), alors pour chaque 65 milligrammes de zinc dissous dans un quelconque des éléments de la pile, il y aura production de

$2 \times 1 =$	2	milligrammes d'hydrogène,
	16	— d'oxygène,
	207	— de plomb,
$(2 \times 127) =$	254	— d'iode,
	118	— d'étain, et
$(2 \times 35,5) =$	71	— de chlore;

et ces nombres 65, 1, 16, 207, 127, 118 et 35,5 correspondent respectivement aux équivalents chimiques (1) des éléments.

Si trois vases semblables A, B, C, avec lames de platine et contenant de l'eau acidulée, sont disposés comme dans la figure 267, et qu'un courant de pile les traverse, la

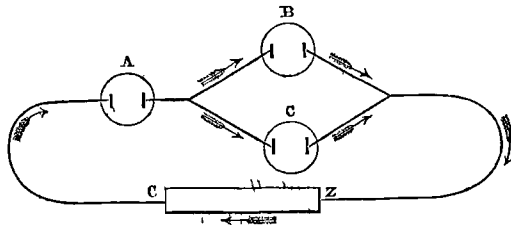


Fig. 267.

somme des quantités de gaz dégagées en B et C est exactement égale à la quantité dégagée en A.

(1) Ces nombres représentent les poids atomiques des éléments. Les équivalents chimiques seraient respectivement 32,5, 1, 8, 103,5, 127, 59 et 35,5
J. R.

LE VOLTAMÈTRE

Ce fait a conduit Faraday à l'invention du *voltamètre*, qui consiste en un vase contenant de l'eau acidulée et traversé par deux électrodes. Des récipients placés sur les électrodes recueillent les gaz produits. La *quantité de gaz dégagée par minute est une mesure absolue de l'intensité moyenne du courant* pendant cette minute; et la quantité totale de gaz est une mesure de la quantité totale de courant (1).

Il est indispensable de recueillir les gaz séparément, car le platine chimiquement pur a la propriété de les amener à se recombiner (2). La figure 268 représente une forme ordinaire de l'instrument.

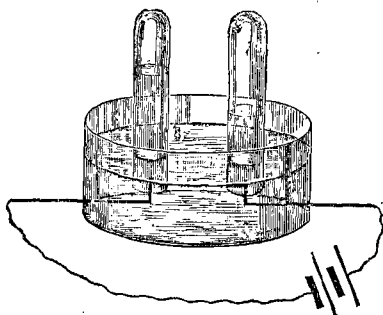


Fig. 268.

Les tubes sont préalablement remplis d'eau et renversés sur les électrodes. Les gaz, en se dégageant, déplacent l'eau. La quantité de gaz développée est connue par les graduations des tubes.

L'électrolyse a une grande importance pratique, car presque toutes les opérations ayant pour but de recouvrir

un objet d'une couche de cuivre, d'argent ou d'or s'effec-

(1) Par exemple, si C est l'intensité du courant mesurée par un galvanomètre des tangentes, et A la quantité de gaz dégagée du temps t_1 au temps t_2 ,

on peut écrire $A = K \int_{t_1}^{t_2} C dt$, où K est une constante.

(2) Faraday, *Exp. Res.*, série VI, vol. I, p. 165-194.

treint en plaçant l'objet qu'il s'agit de recouvrir dans une solution d'un sel du métal que l'on veut déposer, et en le reliant à l'électrode négative de la pile qui doit produire la décomposition (1).

POLARISATION ÉLECTROLYTIQUE

Nous avons supposé jusqu'ici que les courants étaient assez énergiques pour décomposer les liquides employés. Si cependant on se sert d'un seul élément Daniell, il n'y a pas de décomposition ; mais il s'établit un état de *polarisation* ou de déformation qui offre la plus grande analogie avec celui qui s'établit dans une bouteille de Leyde chargée.

En fait, la polarisation électrolytique peut être comparée à la charge ordinaire d'une bouteille de Leyde, et la décomposition au cas où la charge de la bouteille est assez puissante pour percer le verre.

MM. Ayrton et Perry (2) ont mesuré la marche progressive de la charge d'un voltamètre et celle du retour de la charge, et ils ont constaté une ressemblance parfaite entre les courbes électrolytiques et celles que l'on obtient pour la charge et la décharge d'une bouteille de Leyde. Ils ont aussi trouvé (3) que les courbes de l'électrolyse et de la bouteille de Leyde sont toutes deux exactement semblables à celles qui représentent la flexion d'une tige par des poids et le retour de la tige à la position normale quand on enlève les poids, et que la même forme d'équation différentielle peut exprimer les trois phénomènes.

Mesure des déviations. — Dans ces expériences, il fallait mesurer des courants et des potentiels diminuant très rapi-

(1) *Chemistry*, de Miller, vol. I, p. 541-548.

(2) *Journal of Soc. of Telegraph Engineers*, 1877, vol. V, n^o XV, XVI, p. 391.

(3) Voir vol. I, p. 106.

dement. On se servait d'un galvanomètre et d'un électromètre à réflexion, dont les index lumineux étaient projetés sur un grand tambour recouvert de papier blanc et tournant très vite.

Pour mesurer les déviations dont la décroissance était très rapide, on notait les limites des oscillations en marquant par des points faits rapidement au crayon les limites extrêmes de l'index lumineux. On obtenait ainsi deux courbes (fig. 269, 1, 3, 5, 7, et 2, 4, 6). Il est clair que la

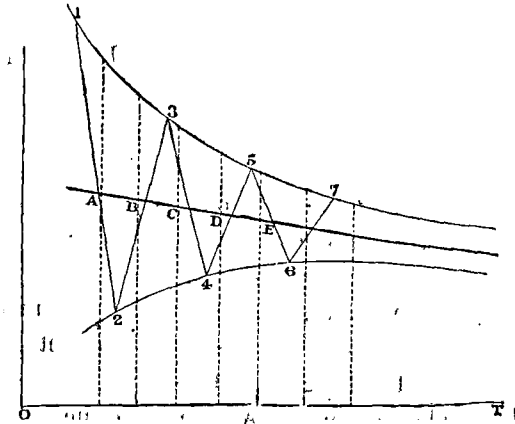


FIG. 269.

courbe A, B, ..., E, exprimant la valeur moyenne du courant ou du potentiel, doit se trouver quelque part entre les deux courbes.

Les auteurs démontrent mathématiquement que chaque point de la courbe moyenne peut être obtenu en prenant le milieu de la partie de l'ordonnée comprise entre les courbes extrêmes.

La ligne en zigzag 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 est le chemin parcouru par l'index lumineux.

Conduite de l'expérience. — Deux lames de platine, chacune de dix centimètres sur huit, étaient placées à la distance de 21,3 centimètres dans un mélange d'eau pure et d'acide sulfurique (densité du mélange 1,016 à 10°C.)

Ces lames pouvaient être reliées au moyen d'une clef à un élément Daniell, et le courant qui passait à un certain moment était mesuré par un galvanomètre.

Les lames étaient en communication permanente avec un électromètre à quadrants permettant de mesurer leurs potentiels.

Lorsque le circuit était interrompu, les lames restaient isolées, puis étaient reliées par l'intermédiaire de bobines de résistance et d'un galvanomètre à réflexion très sensible, à l'aide duquel on mesurait le *courant de retour* ou la *charge résiduelle*.

L'instant de l'observation était noté au moyen d'un *chronographe interrupteur de circuit*. Cet appareil consiste en un *enregistreur Morse* animé d'un mouvement rapide, dans lequel une plume est appuyée par un électro-aimant sur un ruban de papier se déroulant à grande vitesse et produit une ligne continue tant que le courant passe dans l'électro-aimant. Au commencement de chaque seconde, une horloge interrompt le circuit pendant un moment, et produit ainsi un blanc dans la ligne.

Quand on veut noter l'instant d'un phénomène, on interrompt le circuit à la main ou autrement, et il en résulte sur la ligne un blanc, dont la position, par rapport aux deux blancs les plus voisins indiquant les secondes, fait connaître le temps du phénomène.

Résultats. — Le premier résultat obtenu était que, au moment où l'on établissait le contact, il y avait dans le voltamètre un courant extrêmement intense, beaucoup plus

intense que celui que les expérimentateurs pouvaient mesurer.

Dans la figure 270, le temps est mesuré le long de OX, en partant de O, qui représente le moment où l'on ferme le circuit. Les déviations du galvanomètre et de l'électromètre sont mesurées le long de OY.

Courbe AB. — La courbe qui représente la chute du courant de la pile a une forme qui se rapproche de celle de AB (fig. 270), avec cette différence que, pendant le premier quart de minute, l'ordonnée de la courbe est beaucoup

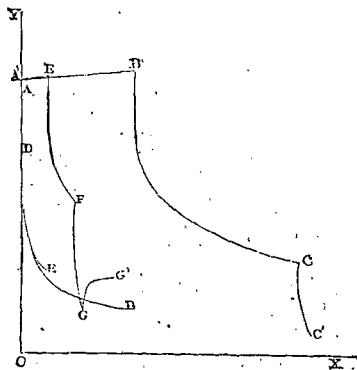


FIG. 270.

plus grande que OA. Ce phénomène est analogue à ce fait, qu'on peut envoyer dans une bouteille de Leyde un courant rapide d'étincelles pendant quelques secondes, jusqu'à ce qu'elle soit chargée; après quoi, elle n'en reçoit plus du tout.

Courbe A'B'C'C'. — Les ordonnées de cette courbe représentent les déviations de l'électromètre. La ligne A'B' représente la marche croissante du potentiel pendant les quarante-six minutes durant lesquelles la pile était reliée

à l'électromètre. Au bout de ce temps, la pile était détachée et les lames étaient maintenues isolées, ne communiquant entre elles qu'à travers l'eau acidulée. La chute du potentiel est représentée par la courbe B'C. Soixante-six minutes après, les lames étaient mises en communication à travers une résistance de 12 000 Ohms, et la courbe CC' montre la chute du potentiel à la fin de l'expérience.

Courbes DE, A' EFGG'. — Lorsque le voltamètre était relié à la pile, le courant diminuait rapidement. La courbe DE représente la chute du courant pendant onze minutes. Pendant le même temps, le potentiel croissait de A' à E. En E, les lames étaient isolées, et EF montre la chute du potentiel. En F, vingt-deux minutes après le commencement de l'expérience, les lames étaient reliées à travers une résistance de 12 594 Ohms, et dans 3 minutes 3/4 le potentiel descendait à G. Les lames étaient alors isolées de nouveau, et le potentiel remontait à G'. La forme de la courbe GG' est exactement semblable à celle de la courbe obtenue par l'émergence de la charge résiduelle d'une bouteille de Leyde qui a été déchargée pendant un temps très court, puis isolée.

APPENDICE AU CHAPITRE XXXVIII

ÉQUIVALENTS ÉLECTRO-CHIMIQUES

« La loi fondamentale de l'électrolyse (1), qui a été établie par Faraday, et confirmée par les expériences de Beetz, Hittorf, etc., s'énonce comme il suit :

» Le nombre des *équivalents électro-chimiques* d'un électrolyte qui sont décomposés par le passage d'un courant électrique pendant un temps donné est égal au nombre d'unités d'électricité que le courant transporte dans le même temps.

» L'équivalent électro-chimique d'une substance est la quantité de cette substance qui est électrolysée par le passage, pendant l'unité de temps, d'une unité de courant, ou, en d'autres termes, par le passage d'une unité d'électricité. Quand l'unité d'électricité est définie en mesure absolue, la valeur absolue de l'équivalent électro-chimique de chaque substance peut être déterminée en grammes.

» Les équivalents électro-chimiques des différentes substances sont proportionnels à leurs équivalents chimiques ordinaires. Mais ces derniers représentent simplement les rapports numériques suivant lesquels les substances se combinent, tandis que les équivalents électro-chimiques sont des quantités déterminées de matière, dont la grandeur dépend de la définition de l'unité d'électricité. »

MESURE DE LA QUANTITÉ ET DE L'INTENSITÉ PAR LES VOLTAMÈTRES

La quantité d'un électrolyte décomposée par un courant étant proportionnelle à la quantité d'électricité qui le traverse, on peut mesurer cette quantité par le volume ou le poids des corps décomposés par le courant dans un temps donné. Si le courant est constant, on en déduit l'intensité. Tout appareil disposé de façon à recueillir les produits de l'électrolyse est un *voltamètre*.

(1) Maxwell, vol. I, § 255, p. 307.

Dans le voltamètre à eau acidulée, on mesure le volume soit de l'hydrogène dégagé, soit du mélange détonant fourni par la décomposition de l'eau, et on le ramène à la température de 0° C. et à la pression étalon (760 millimètres de mercure ordinairement) (1), et la quantité d'électricité est mesurée soit par le volume en centimètres cubes du gaz dégagé dans un temps donné, soit par le poids en grammes de l'hydrogène seulement.

Il est préférable d'employer des voltamètres à dissolution salines métalliques, dont les électrodes soient des métaux de même nature que celui du sel, et l'on choisit de préférence les sels d'argent ou de cuivre, dont les métaux sont sans action sur l'eau; le sel d'argent est plus coûteux, mais, en raison de l'équivalent élevé de l'argent (108), les chances d'erreur sont diminuées. On déduit l'intensité du courant de l'accroissement du poids de l'électrode sur laquelle se dépose le métal ou de la diminution de poids de l'autre électrode, ou mieux de la moyenne de ces deux poids et du temps pendant lequel le courant a passé. P étant le poids du métal déposé à l'électrode négative dans t minutes, A l'équivalent chimique de ce métal par rapport à l'hydrogène, le même courant dégagerait dans l'unité de temps $\frac{P}{At}$ grammes d'hydrogène dans le voltamètre à eau acidulée.

D'après M. Kohlrausch (*Pogg. Ann.*, vol. CXLIX, 1873), la quantité d'argent déposée par un courant de 1 weber par seconde est de 1,1363 milligr. Il en résulte que l'unité électro-magnétique C. G. S. de courant dépose 0,011363 gr. d'argent, ou décompose 0,000947 gr. d'eau, ou dégage un poids de 0,000105 d'hydrogène.

L'équivalent chimique de l'argent étant 108, il faudra $\frac{108}{0,011363}$ ou 9505 unités absolues électro-magnétiques pour déposer un équivalent d'argent (108 gram.), ou d'eau (9 gram.), ou d'un électrolyte simple. En unités statiques C. G. S., il faudra $9505 \times 9 \times 10^{10} = 2,85 \times 10^{14}$ environ.

COMPARAISON DES VOLTAMÈTRES ET DES GALVANOMÈTRES

En général, quand on veut mesurer la quantité totale d'électricité, on se sert d'un voltamètre, et quand on veut simplement l'intensité du courant, du galvanomètre. Le voltamètre a un grand avantage sur les

(1) On a proposé de prendre comme étalon de pression dans le système C. G. S. la pression de 10^6 dynes ou de 1 mégadyne par centimètre carré, ce qui correspond à Paris à une hauteur barométrique de 749,8 millim. (Everett, *Units, etc.*, p. 33).

appareils électro-magnétiques ou électro-dynamiques. Tandis que les indications de ces derniers varient avec l'appareil employé, et qu'elles doivent être multipliées par une *constante* particulière à chacun d'eux pour devenir comparables, les quantités d'électrolyte décomposées dans un temps donné ne dépendent que du courant et nullement de la forme du voltamètre. Tous les voltamètres donnent la même indication quand ils sont traversés par le même courant, ou par des courants égaux, et c'est dans ce sens que l'on a dit, page 308, qu'ils donnaient une mesure absolue de l'intensité. Un courant fournissant n centimètres cubes de gaz par minute est parfaitement défini, tandis qu'un courant qui donne une déviation δ au galvanomètre ne l'est pas, puisque δ varie avec l'appareil. Mais l'usage des voltamètres est restreint, parce qu'ils affaiblissent beaucoup le courant en introduisant de grandes résistances, même quand on substitue à l'eau acidulée des solutions métalliques. En intercalant dans un même circuit un galvanomètre des tangentes et un voltamètre, on peut déterminer la constante du galvanomètre par le volume ou le poids de gaz V dégagé dans l'unité de temps. On a $C = K \operatorname{tang} \delta = V$. Connaissant K , le galvanomètre permet ensuite de trouver la quantité q qui a passé dans un temps donné, $q = Kt \operatorname{tang} \delta$.

CONDUCTION ÉLECTROLYTIQUE

« De tous les phénomènes électriques, dit M. Maxwell, l'électrolyse semble celui qui peut nous donner le plus d'éclaircissement sur la nature véritable du courant électrique, parce que nous y trouvons comme parties essentielles du même phénomène des courants de matière ordinaire et des courants d'électricité. Il est naturel de supposer que les ions servent de véhicules à l'électricité, et en particulier que chaque molécule de cation est chargée d'une quantité déterminée d'électricité positive, la même pour toutes les molécules de cation, et que chaque molécule d'anion est chargée d'une quantité égale d'électricité négative. De cette façon, le mouvement opposé des ions à travers l'électrolyte serait une représentation physique complète du courant électrique. »

PRODUITS SECONDAIRES DE L'ÉLECTROLYSE.

Le dégagement des ions aux électrodes donne souvent naissance à une action chimique secondaire, en sorte que l'on trouve aux électrodes, non pas les ions, mais les produits de l'action des ions sur l'électrolyte. Ainsi, dans la décomposition du sulfate de soude, on

trouve à l'anode de l'oxygène et de l'acide sulfurique, et à la cathode, de la soude et de l'hydrogène. Tout se passe comme si, suivant l'ancienne théorie de la constitution des sels, le sulfate de soude était décomposé par l'électrolyse en acide sulfurique et soude, et si l'eau de la solution était décomposée en même temps en oxygène et hydrogène. Il y aurait à la fois un équivalent de sel et un équivalent d'eau électrolysés, ce qui serait contraire à la loi des équivalents électrochimiques. Mais si on suppose que les constituants du sulfate de soude soient le radical SO^4 et le métal Na (sodium), le radical mis en liberté à l'anode, ne pouvant exister à cet état, décompose l'eau et donne de l'acide sulfurique et de l'oxygène, tandis que le sodium mis en liberté à la cathode décompose également l'eau de la solution et donne de la soude et de l'hydrogène.

Il est douteux que l'eau pure puisse être électrolysée, tant est grande sa résistance; mais la plus petite trace de matière étrangère diminue beaucoup cette résistance. On peut alors considérer l'électrolyse de l'eau acidulée comme due seulement à la décomposition de l'acide sulfurique SO^2H , le radical SO^4 se portant à l'anode, où il se combine avec l'eau de la solution pour reformer l'acide SO^2H , en sorte qu'avec quelques gouttes d'acide on peut obtenir la décomposition d'une quantité d'eau indéfinie.

POLARISATION DES ÉLECTRODES.

Le phénomène connu sous le nom de *polarisation des électrodes* est le résultat de l'accumulation sur les électrodes des éléments de l'électrolyte séparés par le passage du courant. Il consiste dans la production d'une force électro-motrice agissant dans une direction opposée à celle du courant qui produit l'électrolyse, et qui se manifeste de la façon suivante. Quand on commence à faire passer le courant électrolytique, ce courant diminue d'abord d'intensité, puis devient stable, comme si la résistance du circuit augmentait pendant quelques instants avant de prendre une valeur fixe. Quand on interrompt le courant électrolytique, on observe un courant inverse dit de *polarisation*, en remplaçant la pile par un galvanomètre.

Les premiers éléments de la décomposition qui arrivent aux électrodes ne se dégagent pas librement, on abandonnant l'électricité dont ils sont chargés; ils se déposent à la surface de chaque électrode, en couche mince très adhérente et en quelque sorte chimiquement combinée avec elle. A ce moment, la force de polarisation, qui dépend de cet état chimique, est proportionnelle à l'épaisseur du dépôt, et par suite à la quantité de courant qui a passé. Mais les

dépôts postérieurs ne sont plus aussi intimement liés à la surface de l'électrode, et dès lors les nouveaux ions tendent à devenir libres et finalement se diffusent dans le liquide, ou se précipitent à l'état solide, ou se dégagent à l'état de gaz. Le dépôt a donc une épaisseur limitée, et par suite la force de polarisation atteint une valeur limite.

Pour vaincre cette force de polarisation, il faut une force électromotrice d'une certaine grandeur, et on s'explique ainsi que la décomposition d'un électrolyte exige une force électro-motrice de grandeur déterminée, alors que la conduction du courant dans l'électrolyte, obéissant à la loi de Ohm, la plus petite force devrait produire un courant d'intensité proportionnelle.

Ainsi : 1° Avec un courant constant, la polarisation, faible au début, croît peu à peu, puis prend une valeur constante. Cette valeur croît avec l'intensité du courant, mais dans un rapport moindre.

2° La force de polarisation varie avec les métaux, et la nature des liquides ; chaque dépôt engendre une force électro-motrice propre, et la force totale est la somme des forces engendrées à chaque électrode.

Dans la décomposition de l'eau acidulée avec des électrodes de platine, les lames se polarisent, l'une par l'oxygène, l'autre par l'hydrogène. La polarisation par l'hydrogène est très énergique, La condensation du gaz par une surface de platine est telle qu'il faut la chaleur pour la détruire. On appelle *piles secondaires* les piles fondées sur la polarisation des électrodes. Les *piles à gaz* sont de simples voltmètres à eau acidulée avec des électrodes de platine. Avec de l'eau acidulée et des électrodes de plomb, on obtient une polarisation intense (voir chap. xxxix).

Lorsque le dépôt est de même nature que l'électrode sur laquelle il se forme, celle-ci se polarise peu : c'est ce qui arrive quand on décompose un sel avec deux lames du métal qui forme la base de ce sel, comme du sulfate de cuivre avec des électrodes de cuivre, du sulfate de zinc avec des électrodes de zinc.

La propriété dépolarisante d'une dissolution métallique est limitée au métal qu'elle contient ; mais de plus, suivant M. Lippmann (*Journal de Physique*, vol. VIII, p. 48, 1879), la polarisation d'une électrode négative dans une solution métallique de nature autre que celle correspondant au métal de l'électrode pourrait disparaître en ajoutant à la solution une très faible quantité d'un sel contenant le métal de l'électrode. L'exactitude de ce résultat est contestée par M. Macaluso (*Beiblätter de Wiedemann*, n° 9, 1880).

3° Quand on augmente la surface des électrodes, la densité superficielle et la force de polarisation mettent un temps beaucoup plus

long à atteindre leur valeur limite. Quand il s'agit d'un dépôt d'hydrogène (et c'est le cas où la polarisation est la plus énergique), et que l'électrode est en contact avec l'air, l'augmentation de surface de cette électrode facilite la recombinaison directe de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air, ce qui diminue encore la polarisation. On explique encore de cette façon pourquoi la polarisation augmente, et pourquoi le courant diminue quand on place une pile dans le vide.

4° Quand le courant originaire cesse, la polarisation se dissipe avec une rapidité qui dépend en partie de sa force, et en partie de la nature du milieu environnant et de l'action chimique, mécanique ou thermique à laquelle la surface de l'électrode est exposée. Quand le dépôt est peu dense, ou la polarisation faible, celle-ci met un temps très long à disparaître complètement. Si le dépôt approche de sa valeur limite, elle décroît très rapidement. La polarisation sur une grande lame est bien plus faible que sur une petite, mais elle se maintient plus longtemps.

MESURE DE LA FORCE ÉLECTRO-MOTRICE DE POLARISATION.

Wheatstone mesure la force électromotrice A d'une pile à courant constant dans un circuit métallique ; en interposant un voltamètre, cette force se réduit à A' . La différence $A - A'$ donne la force électromotrice de polarisation dans le voltamètre.

M. Ed. Becquère a déterminé les forces de polarisation de divers métaux dans l'hydrogène, en formant des couples avec deux lames, l'une de zinc amalgamé, l'autre du métal que l'on veut étudier, et les plongeant dans l'eau acidulée. Il faisait deux mesures successives de la force électro-motrice de chacun des couples ; l'une rapidement au moment de la fermeture du circuit, ce qui donne la force électro-motrice avant toute polarisation ; l'autre après que cette polarisation s'est produite : la différence exprime la force de polarisation du métal recouvert d'hydrogène.

Pour étudier la polarisation dans les dissolutions métalliques, M. Lippmann a pris la disposition suivante : Le fil du métal à essayer A plonge dans la dissolution et sert d'électrode négative, d'électrode de sortie, à un courant de pile qu'on peut ouvrir ou fermer à volonté, et qui est amené dans le liquide par une électrode auxiliaire B . Le fil A est en communication permanente avec la colonne de mercure d'un électromètre capillaire, dont l'autre pôle communique avec un fil A' du même métal plongeant dans le liquide. Ce fil A' , qui n'est traversé par aucun courant, sert uniquement à mesurer, par compa-

raison, les variations de force électro-motrice du fil A. Tant que le courant n'est pas fermé, les fils A et A' sont égaux, et l'électromètre reste au zéro. Lorsqu'on fait passer un instant le courant et que A s'est polarisé, l'électromètre est dévié du zéro, et reste dévié après l'ouverture ; il ne revient au zéro que quand la polarisation s'est dissipée. On constate ainsi que le cuivre se polarise dans une dissolution de sel de zinc, par exemple, et qu'il ne se polarise pas dans une dissolution d'un sel de cuivre.

Comparaison de la pile secondaire avec la bouteille de Leyde (1).

De même qu'une pile voltaïque peut être comparée à une machine électrique, de même une pile secondaire peut être comparée à une bouteille de Leyde : car elle peut emmagasiner une charge électrique et la restituer sous forme de décharge. On retrouve dans la pile secondaire les phénomènes de décharge résiduelle. Ainsi, quand les électrodes polarisées ont été réunies et que la décharge paraît complète, en les séparant pendant un certain temps, puis les réunissant de nouveau, on obtient une seconde décharge dans la même direction que la première.

Mais, entre les deux, il y a aussi certaines différences importantes : la charge de la bouteille de Leyde est exactement proportionnelle à la différence de potentiel des deux surfaces, et la charge qui correspond à l'unité de force électro-motrice, ou la capacité, est une quantité constante. La quantité correspondante, que l'on peut appeler la capacité de la pile secondaire, croît en même temps que la force électro-motrice.

La capacité de la bouteille dépend de l'aire des surfaces opposées, de la nature de la substance interposée, mais ne dépend pas de la nature des surfaces métalliques elles-mêmes. La capacité de la pile secondaire dépend de l'aire des électrodes, mais non de leur distance : elle dépend de la nature des électrodes et de celle du liquide.

Quand un condensateur est chargé avec une pile, la différence de potentiel des deux surfaces est égale à la force électro-motrice de la pile, si le diélectrique isole bien. Dans la pile secondaire, la différence de potentiel aux électrodes est bien plus petite que la force de la pile de charge, en sorte que, pour obtenir une grande force électro-motrice dans la pile secondaire, il faut une pile principale très forte, ou réunir en série un grand nombre d'éléments de pile secondaire qu'on a chargés en surface.

(1) Maxwell, vol. I, art. 271.

Mais, d'autre part, la densité superficielle de la charge dans la pile secondaire est bien plus grande que celle de la charge que l'on peut accumuler sur les surfaces d'une bouteille de Leyde. Aussi M. Varley recommande l'usage de lames d'or, ou de platine, ou de charbon dans un acide dilué, comme un moyen d'obtenir des condensateurs de grande capacité, plus économique que l'emploi de feuilles d'étain séparées par une matière isolante.

Enfin, dans la bouteille de Leyde, l'énergie réside dans l'état de déformation du diélectrique ; dans la pile secondaire, elle réside dans la condition de la couche de matière constituée à la surface de l'électrode par la réunion intime du dépôt et de la substance même de l'électrode, condition qui varie de la combinaison chimique à la condensation superficielle, l'adhérence mécanique ou la simple juxtaposition.

EXPÉRIENCES DE MM. WARREN DE LA RUE ET MÜLLER (1).

Les expériences suivantes, entreprises dans le but d'étudier la condition électrique des électrodes d'un tube à décharges, après le passage de la décharge, montrent l'analogie des phénomènes de polarisation et de condensation. La figure 271 représente la disposition de l'appareil.

KK' est une clef de forme particulière pour couper la communication d'un instrument, le voltamètre, par exemple, avec la pile B, et l'établir aussitôt après avec un galvanomètre G. Les électrodes de la pile sont attachées respectivement aux vis de serrage, *c* et *d*, fixées sur une règle d'ébonite, supportée elle-même par deux colonnes d'ébonite. Cette règle est traversée par des pointes de contact reliées métalliquement aux vis *c* et *d*, et contre lesquelles viennent s'appliquer les ressorts de laiton *a e* et *b f*, quand on les abandonne à eux-mêmes. La pile se trouve alors en communication métallique, par les vis *a* et *b*, avec tout appareil relié à ces vis, comme le voltamètre V. Ce voltamètre, d'une résistance de 20 ohms, est muni d'électrodes de platine de 62 millimètres de longueur sur 0,62 millimètre de diamètre et distantes de 6,2 millimètres ; il est chargé d'acide sulfurique pur dilué dans la proportion de 1 volume d'acide à la densité de 1,84 pour 8 volumes d'eau. Si on abaisse subitement les ressorts, en pressant avec les doigts sur les disques d'ébonite, *e* et *f*, le voltamètre est séparé de la pile et relié instantanément

(1) *Décharge disruptive avec la pile à chlorure d'argent* (supplément à la partie III, *Nature* du 1^{er} juillet 1880).

au galvanomètre G. Ce galvanomètre n'est pas celui représenté dans la figure, mais un galvanomètre Thomson, dont la constante

$$C = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ megohm}} = 1874 \text{ divisions de l'échelle.}$$

En mettant le voltamètre en communication, pendant une minute au moins, avec une pile de 10 éléments à chlorure d'argent, et pressant subitement sur les ressorts *e* et *f*, on obtient une déviation à

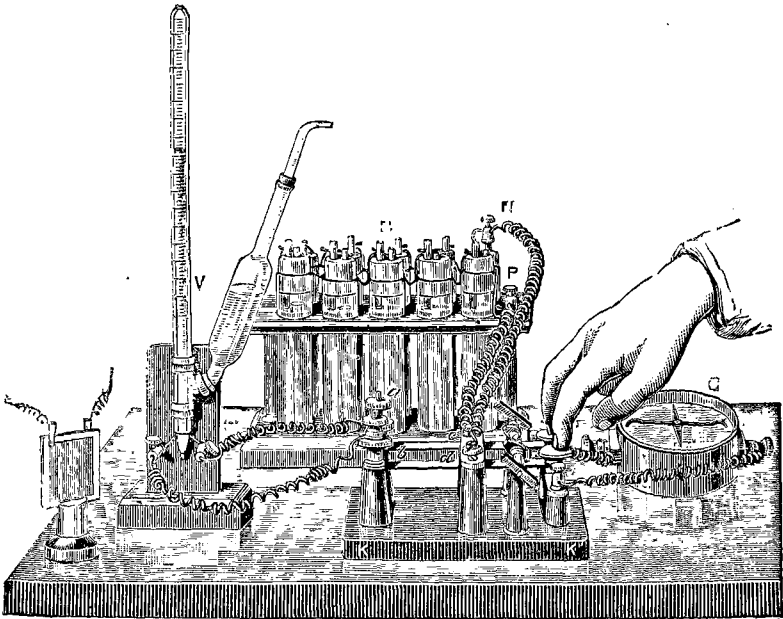


FIG. 271.

gauche de plus de 1000 divisions de l'échelle, malgré l'introduction de la dérivation $\frac{1}{999}$: en supprimant la dérivation, on aurait donc obtenu une déviation supérieure à 10^6 divisions. Comparant cette déviation à celle produite par un condensateur de 1 demi-microfarad chargé avec 240 éléments, on en conclut que la déviation produite par le voltamètre est équivalente à celle d'un condensateur de 111 microfarads.

On substitue au voltamètre le petit condensateur figuré en C : c'est un petit carreau fulminant composé d'une feuille mince de verre recou-

verte sur chacune de ses faces d'une feuille d'étain, et d'une capacité de 0,00055 microfarad. Chargé avec 3600 éléments, puis relié au galvanomètre Thomson avec la dérivation $\frac{1}{9}$, en pressant sur *e* et *f*, on a une déviation à gauche de 136,5 divisions ; multipliant ce nombre par 9,92, valeur exacte du pouvoir multiplicateur de la dérivation (en tenant compte de ce que l'introduction de la dérivation a changé la résistance totale du circuit), on a 1354 divisions.

On relie maintenant à *a* et *b* l'appareil (fig. 218, p. 182), composé de deux disques de 38 millimètres de diamètre, distants de 3,25 millimètres. La capacité de ce condensateur à air est de 0,000058 microfarad. Avec 3600 éléments, aucune décharge électrique ne se manifeste entre les disques, et l'appareil se charge simplement comme un condensateur. La déviation obtenue en abaissant les clefs *e* et *f* était de 150 divisions (sans dérivation), encore à gauche. Le sens de la déviation est donc le même, qu'il s'agisse d'un voltamètre ou d'un condensateur.

Un tube à vide résiduel d'acétylène est substitué au condensateur à air et mis en communication avec une pile de 3600 éléments. Le courant qui le traverse est de 0,00681 weber, le potentiel du tube est de 2980 éléments, et sa résistance de 449 500 ohms. En abaissant les ressorts *e* et *f* de façon à séparer le tube de la pile et à le relier au galvanomètre, on trouve une déviation à gauche de 11 divisions, indiquant par suite un courant d'une intensité de

$$\frac{11}{1874 \times 10^6} = \frac{1}{170 \times 10^6} \text{ weber.}$$

Le diagramme fig. 272 explique l'action de la clef spéciale de la figure 271. Quand la manette est poussée à gauche, le tube TT' est mis en communication métallique avec la pile, dont les pôles sont attachés en *c* et *d* (disposition équivalente à celle des ressorts de la figure 271, appuyant contre *c* et *d*) ; quand la manette est poussée à droite, on intercepte la décharge de la pile à travers TT' et les électrodes N et P du tube sont mises dans le circuit du galvanomètre qui aboutit en *e* et *f* (ce qui équivaut à abaisser les ressorts dans la figure 271).

L'expérience suivante montre que le courant de polarisation d'un voltamètre dure encore longtemps après que l'appareil a été séparé de la pile. Les appareils sont disposés comme l'indique la figure 273, avec un galvanomètre des tangentes intercalé dans le circuit entre la pile et le voltamètre. La dérivation $\frac{1}{9,99}$ était employée avec le galvanomètre Thomson. Avec un élément, le galvanomètre des tangentes ne déviait pas, et, en abaissant *e* et *f*, on avait une déviation de 220 au Thomson. Avec 3 éléments, le galvanomètre des tangentes indiquait un courant de 0^m,03463 ; en abaissant *e* et *f*, le courant de polarisa-

tion donnait au Thomson 984 divisions ; au bout d'une minute, on avait encore 110 ; 80 au bout de deux, et encore 49 au bout de sept minutes.

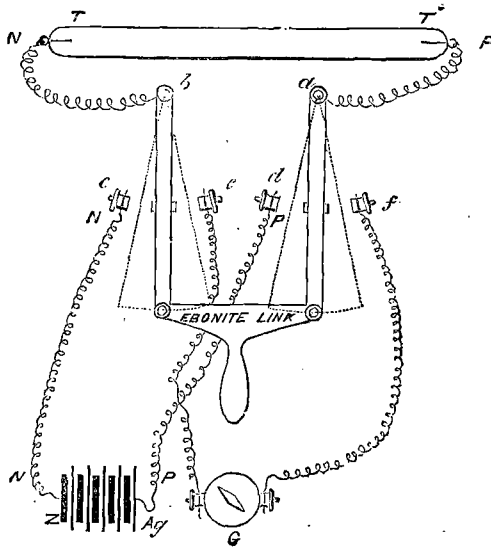


FIG. 272.

Pour rendre évidente la direction du courant de polarisation, on prenait la disposition de la figure 274, dans laquelle le galvanomètre Thomson, avec la dérivation $\frac{1}{999}$, était introduit dans le circuit entre la pile et le voltamètre. Une dérivation de résistance variable était intercalée entre *a* et *b*, afin de dériver la plus grande partie du courant. Une plaque métallique *ss* pouvait glisser sous *e* et *f* pour fournir un court circuit au courant de retour traversant le galvanomètre. Avec une dérivation de 13 ohms entre *a* et *b*, le courant donnait au voltamètre un dégagement de gaz à peine visible.

En établissant les communications avec la pile, le courant avait la direction de la flèche pleine et donnait une déviation de 133 divisions à gauche ; en abaissant *e* et *f* sur la plaque métallique *ss*, le courant de retour avait la direction inverse indiquée par la flèche pointillée et donnait une déviation de 425 divisions à droite. On avait à peu près la même déviation sans abaisser *e* et *f*, en se contentant de couper le circuit de la pile en *N*, car le courant de retour traversait la dérivation de *a* à *b*.

En substituant au voltamètre, soit la cloche avec électrodes en

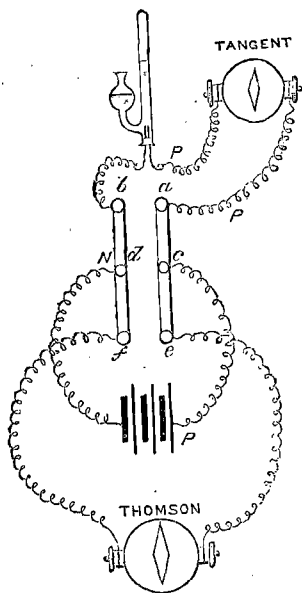


FIG. 273.

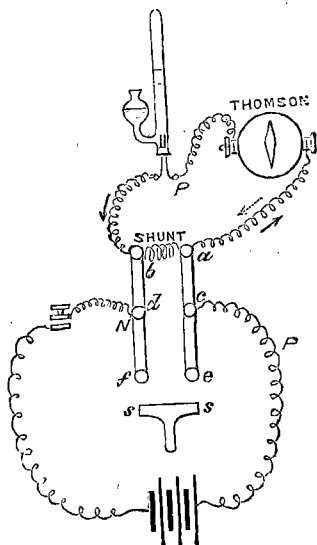


FIG. 274.

forme de disques, soit un tube à hydrogène, le retour de la charge statique donnait une déviation de même sens que le courant de retour du voltamètre.

MOYENS DE SUPPRIMER OU D'ATTÉNUER LES EFFETS DE POLARISATION DANS LES PILES.

Lorsqu'on fait une série d'expériences avec une pile voltaïque susceptible de se polariser, la polarisation diminue quand le courant ne passe pas, de sorte que, chaque fois que l'on ferme le circuit, le courant est à ce moment plus intense que lorsque le circuit est resté fermé quelque temps. D'autre part, si on diminue la résistance d'un circuit par l'emploi d'une dérivation de faible résistance, la polarisation augmente beaucoup ; et, au moment où l'on supprime la dérivation pour rétablir le circuit ordinaire, l'intensité du courant est, au début, bien inférieure à l'intensité normale.

Pour éviter cette irrégularité dans l'intensité, qui trouble les expériences de mesure, il faut supprimer la polarisation ou l'atténuer autant que possible.

La polarisation à la surface du zinc plongé dans une dissolution de sulfate de zinc ou d'acide sulfurique étendu est négligeable. Le principal siège de la polarisation est à la surface du métal négatif qui, dans l'eau acidulée, se couvre de bulles d'hydrogène. Ces bulles, empêchant le liquide de toucher le métal, diminuent la surface de contact et augmentent la résistance du circuit ; de plus, entre les bulles visibles et le métal, il y a une couche mince d'hydrogène, adhérente au métal, et produisant une force électro-motrice de polarisation, qui diminue la force de la pile.

Divers moyens ont été employés pour détruire cette couche. On peut la diminuer en donnant une grande surface à l'électrode négative, ou par des moyens mécaniques tels que l'agitation du liquide ou le brossage de la surface. Dans la pile de Smée, l'électrode négative est une plaque verticale de platine *platiné* ou de cuivre *platiné*, c'est-à-dire recouvert par la galvanoplastie de platine pulvérulent, d'où les bulles d'hydrogène s'échappent facilement, et par leur ascension produisent dans le liquide un courant qui aide à détacher les autres bulles à mesure qu'elles se forment.

L'emploi de moyens chimiques est plus efficace. Ces moyens sont de deux sortes : 1° dans les piles de Grove et de Bunsen, la plaque négative (platine ou charbon) plonge dans un liquide riche en oxygène, l'acide azotique. On emploie aussi l'acide chromique, qui ne donne pas de fumées acides. L'hydrogène se combine avec l'oxygène, au lieu de former une couche sur la plaque. On a employé aussi une plaque de cuivre oxydée à sa surface : on a proposé de renouveler cet oxyde en donnant à la plaque la forme d'un disque plongeant à moitié dans le liquide et tournant lentement, de façon que l'air agisse successivement sur ses divers points (Joule). 2° On emploie comme liquide dépolarisateur un sel du métal qui forme l'électrode négative : dans la pile Daniell, le cuivre plonge dans du sulfate de cuivre.

On peut comparer les différentes piles au point de vue de la polarisation de la façon suivante : On relie la pile à un condensateur à travers un galvanomètre, et on mesure la force électro-motrice par l'arc d'impulsion ; puis, on recommence l'expérience après avoir mis la pile en court circuit (par une dérivation sans résistance reliant ses deux pôles) pendant une minute, par exemple. La différence des arcs d'impulsion permet d'apprécier la polarisation produite par le court circuit.

ZINC AMALGAMÉ.

Les électrodes amalgamées ont pour effet de retenir les bulles d'hydrogène. Si on plonge du zinc du commerce dans l'eau acidulée, il y a un dégagement continu d'hydrogène provenant de la décomposition du liquide par les courants qui se forment entre deux parties inégalement attaquées : ce dégagement s'arrête si le zinc est amalgamé, car les premières bulles restant adhérentes empêchent les courants de se former. On a fait remarquer aussi (vol. I, p. 430) que l'amalgamation met toutes les parties de la surface dans le même état.

Dans les piles de Bunsen et de Grove, les zincs sont toujours amalgamés ; dans la pile Marié-Davy, le zinc s'amalgame lui-même ; dans la pile Leclanché, l'amalgamation n'est pas nécessaire ; cependant, elle tend à empêcher la formation de cristaux sur le zinc. Dans les piles à sulfate de cuivre, l'amalgamation est inutile quand le zinc plonge dans du sulfate de zinc ; comme ce sel se forme toujours au bout de peu de temps, on n'amalgame plus les zincs. M. Varley a même reconnu que la non-amalgamation du zinc était une condition de durée des piles, à raison de l'action du mercure sur le dépôt de cuivre formé sur le zinc.

RHÉOTOME LIQUIDE.

Si l'on place dans le circuit d'un courant électrique un voltamètre à eau acidulée muni d'une électrode de platine et d'une électrode d'aluminium, le courant passe très bien quand le platine forme l'électrode positive, et est au contraire presque complètement arrêté quand l'aluminium forme l'électrode positive, parce que l'oxyde produit (l'alumine) est insoluble et mauvais conducteur. Ce fait, signalé par M. Planté (1), a été appliqué par M. Ducretet (2) à la construction d'un rhéotome à direction constante qui peut recevoir quelques applications. M. Caël (3) a reconnu que l'arrêt du courant est plus complet en employant une dissolution de bichromate de potasse et mieux encore de bicarbonate de soude.

(1) *Comptes-rendus*, vol. XLIX, p. 402, 1859.

(2) *Journal de Physique*, vol. IV, p. 84, 1875.

(3) *Annales Télégraphiques*, vol. III, p. 250, 1876, et vol. V, p. 64, 1878.

ÉLECTRO-MOTOGRAPHIE D'EDISON.

Cet appareil permet d'obtenir sous l'influence d'une force électrique très faible des effets mécaniques sans l'intervention d'aucun organe électro-magnétique. Voici son principe (1) : Si une feuille de papier, un peu rugueuse, trempée dans certaines solutions, telles que de la potasse, est appliquée sur une plaque métallique platinée, reliée au pôle positif d'une pile, et qu'on fasse glisser à sa surface une lame métallique soit en platine, soit de préférence en plomb, reliée au pôle négatif, il se produit, au moment du passage du courant, un certain *lissage de la surface* du papier, qui rend le frottement beaucoup plus faible que quand le courant ne passe pas. Supposons la feuille de papier enroulée sur un cylindre horizontal tournant, et la tige métallique qui sert de frotteur maintenue dans une position déterminée par un ressort qui fait équilibre au frottement, quand le courant ne passe pas. Dès que le courant passe, le frottement diminue et la tige métallique, obéissant au ressort, peut déterminer la fermeture d'un circuit local contenant un appareil télégraphique. En interrompant le courant, la tige se déplace dans le sens du mouvement du cylindre, jusqu'à ce que la tension du ressort fasse de nouveau équilibre au frottement, et le circuit local est ouvert. Si la tige est reliée à une membrane de mica montée sur une caisse de résonance, et qu'on interpose le système dans le circuit d'un téléphone à pile, les sons du téléphone seront reproduits par les vibrations de la membrane. On a ainsi un récepteur téléphonique très sensible, sans organe magnétique.

Cet effet peut être déterminé par un certain nombre de substances : avec la potasse, le cyanoferrure de potassium et la plupart des alcalis, le frotteur doit être relié au pôle négatif ; au contraire, avec l'acide pyrogallique et l'azotate de soude, il doit être relié au pôle positif. On obtient cependant l'effet avec le silicate de soude et même la potasse, quel que soit le pôle mis en communication avec le frotteur. Enfin, certaines substances, comme le sulfate d'aniline, produisent l'effet quand la résistance du circuit est très grande, alors qu'elles ne le produisent pas sur des circuits peu résistants.

(1) *Comptes-rendus*, vol. LXXXVII, p. 270, 1878.

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DES ÉLECTROLYTES (1).

La mesure de la résistance électrique des électrolytes est difficile, à cause de la polarisation des électrodes, qui fait que la différence de potentiel observée entre les électrodes métalliques est plus grande que la différence de potentiel réellement due au courant de la pile. On peut surmonter cette difficulté de diverses manières.

Ainsi, on élimine la polarisation en employant des électrodes de nature convenable, par exemple des électrodes de zinc dans une solution de sulfate de zinc. En donnant aux électrodes une surface très grande par rapport à la section de la partie de l'électrolyte dont on veut mesurer la résistance, et employant seulement des courants de courte durée et alternativement de sens contraires, on peut faire les mesures avant que le passage du courant ait développé une polarisation intense.

Enfin, par deux expériences différentes, dans l'une desquelles le courant traverse une colonne d'électrolyte beaucoup plus longue que dans l'autre, et réglant la force électro-motrice de telle sorte que l'intensité du courant et sa durée soient à peu près les mêmes dans les deux cas, on élimine encore la polarisation.

Dans les expériences de Paalzow, les électrodes avaient la forme de grands disques placés dans des vases plats séparés et remplis avec l'électrolyte : la communication était établie au moyen d'un long siphon rempli aussi avec l'électrolyte et plongeant dans les deux vases. Les deux siphons avaient des longueurs différentes. Après avoir mesuré les résistances R_1 et R_2 de l'électrolyte contenu dans les siphons, on remplissait ceux-ci de mercure et on mesurait leurs nouvelles résistances R'_1 et R'_2 . Le rapport de la résistance de l'électrolyte à celle d'une masse de mercure de même forme à 0°C était déduite de la formule $\rho = \frac{R_1 - R_2}{R'_1 - R'_2}$.

Il suffit de multiplier par la résistance spécifique du mercure pour avoir la résistance spécifique du liquide.

MM. Kohlrausch et Nippoldt ont déterminé la résistance de mélanges d'acide sulfurique et d'eau. Ils employaient des courants magnéto-électriques alternatifs, dont la force électro-motrice variait de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{7.4}$ d'élément Grove, et au moyen d'un couple thermo-électrique cuivre-fer, ils réduisaient cette force à $\frac{1}{229000}$ de Grove. Ils ont trouvé que la loi de Ohm s'applique à cet électrolyte entre ces limites de force

(1) Maxwell, vol. I, art. 363.

électro-motrice. La résistance passe par un minimum quand le mélange contient $\frac{1}{3}$ d'acide sulfurique. La résistance diminue quand la température augmente.

M. Lippmann (1) place dans le même circuit de pile la résistance liquide à mesurer x et une caisse de résistances graduées dont il détermine la résistance R par la condition que la différence des potentiels aux extrémités de x soit égale à la différence des potentiels aux extrémités de R : on a alors $x = R$. Le liquide est contenu dans un tube de verre terminé par deux électrodes métalliques servant à amener le courant et ayant la forme de disques perpendiculaires à l'axe du tube, afin que les surfaces équipotentielles du tube leur soient parallèles. Dans la paroi du tube sont forés deux trous fins p et p' , destinés à mettre les points correspondants de la colonne liquide en communication avec un électromètre capillaire par l'intermédiaire d'ajutages latéraux mastiqués sur le tube et remplis du même liquide. Un commutateur à mercure (vol. I, p. 477) met les pôles de l'électromètre successivement en communication avec p, p' et avec les extrémités de la caisse de résistances. La valeur de R , pour laquelle l'index de l'électromètre ne varie plus quand on fait basculer le commutateur, donne la résistance de la colonne liquide comprise entre deux sections droites passant par p et p' . La polarisation n'intervient pas, puisque la colonne liquide pp' ne contient aucune électrode traversée par le courant.

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DES GAZ RARÉFIÉS (2).

M. C. F. Varley, dans ses recherches sur le passage du courant à travers les gaz raréfiés (voy. p. 179), a trouvé que la force électromotrice E est égale à une constante E_0 , plus un terme obéissant à la loi de Ohm, c'est-à-dire $E = E_0 + RC$.

Ainsi la force électromotrice nécessaire pour que le courant commence à passer dans un certain tube est de 323 Daniells, mais une force de 304 éléments suffit pour entretenir le courant. L'intensité du courant, mesurée par le galvanomètre, était proportionnelle au nombre d'éléments au-dessus de 304. Avec 305 éléments la déviation était 2, avec 306 elle était 4, avec 307 elle était 6, et ainsi de suite jusqu'à 380 = 304 + 76, où la déviation était de 150 = 76 × 1,97.

« Il semble résulter de ces expériences, dit M. Maxwell, qu'il y a une sorte de polarisation des électrodes, dont la force électromotrice

(1) *Comptes-rendus*, vol. LXXXIII, p. 192, 1876.

(2) Maxwell, vol. I, art. 369.

est de 304 Daniells, et qu'au dessous de cette force, la pile n'a d'autre effet que d'établir cet état de polarisation. Quand la polarisation a atteint son maximum, l'excès de la force électro-motrice au-dessus de 304 éléments fait passer le courant conformément à la loi de Ohm.

» La loi du courant à travers un gaz raréfié présente donc une grande analogie avec la loi du courant à travers un électrolyte, où il faut tenir compte de la polarisation des électrodes. Il convient de rappeler à ce sujet le résultat obtenu par sir W. Thomson (p. 128) que la force électro-motrice nécessaire pour produire une étincelle dans l'air est proportionnelle, non pas à la distance, mais à la distance plus une quantité constante. La force électro-motrice correspondante à cette quantité constante peut être regardée comme l'intensité de polarisation des électrodes. »

Les expériences de MM. de la Rue et Müller, décrites p. 321, ont été entreprises pour reconnaître si, en coupant les communications d'un tube à gaz raréfié après la décharge, les électrodes du tube sont *polarisées chimiquement*, comme le seraient celles d'un voltamètre dans les mêmes circonstances. Des expériences analogues à celles citées ont été faites avec des tubes contenant successivement de l'hydrogène à la pression de 2 millimètres, du gaz d'éclairage à la pression de 3 millimètres et de l'air à la pression de 1^{mm},5. La pile était de 3900 éléments. On la reliait d'abord directement au galvanomètre, le pôle (+) en *e* et le pôle (—) en *f*, en ayant soin de placer un bout de fil entre *e* et *f* comme dérivation, et d'introduire dans le galvanomètre la dérivation $\frac{1}{999}$. On constatait que la déviation était à gauche.

En abaissant *e* et *f*, on obtenait des déviations à gauche de 3 divisions pour l'hydrogène, 7 pour le gaz et 20 pour l'air. Il est clair que, si la déviation était due à une polarisation chimique, elle serait plus grande avec le gaz d'éclairage, qui est un mélange de molécules décomposables, qu'avec l'air. Avec le tube contenant de l'air à la pression de 1 millimètre et 1500 éléments, il n'y avait pas de décharge, et cependant en abaissant les clefs on avait dix divisions à gauche. La déviation dans ce dernier cas était évidemment due à une charge statique.

Les expériences ont été répétées dans des cloches, entre des électrodes en forme de disques, en faisant varier la pression et le nombre d'éléments de manière à ce que le courant passât ou ne passât pas entre les électrodes.

La déviation obtenue en reliant les électrodes du tube au galvanomètre était plus grande quand le courant ne passait pas que lors-

qu'il passait, bien que le nombre d'éléments employés dans le second cas fût plus considérable. Mais on sait que, quand la décharge se produit, le potentiel aux électrodes diminue de valeur, et on a vu que le potentiel d'un tube pouvait n'être que de 430 éléments, alors que la pile reliée à ses électrodes était de 11000 éléments. Il n'est donc pas étonnant que la charge statique des électrodes soit plus grande quand il n'y a pas de décharge que lorsque la décharge s'est produite.

Les auteurs croient donc pouvoir conclure que le courant fourni par les électrodes d'un tube à vide est seulement dû à une charge statique et *non pas* à une polarisation *chimique*.

CONSERVATION DE L'ÉNERGIE DANS L'ÉLECTROLYSE.

Chaleur dégagée par les actions chimiques. — Les phénomènes chimiques sont toujours accompagnés de dégagement ou d'absorption de chaleur : la chaleur qui apparaît ou disparaît dans une réaction est l'équivalent du travail des *affinités chimiques*, c'est-à-dire des forces qui s'exercent entre les molécules des corps mis en présence. Les molécules des corps qui se combinent abandonnent leurs positions actuelles pour obéir aux affinités ; elles se déplacent dans le sens où ces forces les sollicitent à se mouvoir, et la force vive qu'elles engendrent se traduit par un dégagement de chaleur. Inversement, dans la plupart des décompositions chimiques, il y a absorption de chaleur (1).

La quantité de chaleur dégagée ou absorbée par les actions chimiques est indépendante de la durée et de la marche qu'elles ont pu suivre : elle pourra donc être prise pour mesure de ces actions ou du travail des affinités, *pourvu que ce travail ne soit pas accompagné d'autres actions extérieures*.

Dans les circuits voltaïques, ces actions extérieures sont : l'échauffement du circuit, les décompositions des électrolytes qu'ils renferment et les effets mécaniques.

La quantité de chaleur correspondante aux réactions chimiques qui se passent dans une pile se mesure en effectuant ces réactions au sein d'un calorimètre. Quand le circuit de la pile est

(1) Exceptionnellement, la formation d'une combinaison est accompagnée d'une absorption de chaleur, et sa destruction d'un dégagement de chaleur. Les éléments d'une pareille combinaison paraissent alors dans un état d'équilibre forcé et peu stable, qu'ils abandonnent dès qu'ils reçoivent d'une action extérieure le moindre dérangement. Ex : eau oxygénée, polysulfure d'hydrogène.

fermé, cette chaleur totale doit se retrouver : 1° dans la chaleur développée dans le circuit (pile et conducteur); 2° dans la chaleur équivalente à la décomposition des liquides; 3° dans la chaleur équivalente au travail mécanique extérieur.

Chaleur dégagée dans le circuit. — M. Joule a vérifié que, quand une action chimique entretient un courant, la chaleur dégagée dans la pile est plus petite que celle qui correspond aux réactions chimiques qui se passent et que le reste se retrouve dans le circuit extérieur. Si celui-ci est formé d'abord d'un fil peu résistant, puis d'un fil très résistant, la chaleur développée par l'élément pour chaque gramme de zinc dissous est plus grande dans le premier cas que dans le second, mais la somme des chaleurs dans le fil et dans la pile est la même dans les deux cas. Le rapport de la chaleur développée dans l'élément à celle développée dans le fil est égal au rapport des résistances de l'élément et du fil, en sorte que, si le fil est très résistant, presque toute la chaleur se retrouve dans le fil et, si le fil est très conducteur, presque toute la chaleur reste dans la pile.

Signification mécanique de la force électro-motrice. — Appelons θ la quantité de chaleur produite par la dissolution de 1 gramme de zinc dans un élément de pile, a l'équivalent électro-chimique du zinc, i l'intensité du courant, J l'équivalent mécanique de la chaleur : a étant le poids du zinc dissous pendant le passage de l'unité d'électricité, ai sera le poids dissous dans l'unité de temps par le courant i , et la quantité de chaleur correspondante sera $H = \theta ai$. Le travail mécanique correspondant sera $JH = J\theta ai$, et si la pile comprend n éléments, $nJ\theta ai$.

R étant la résistance totale du circuit, le travail mécanique équivalent à l'échauffement du circuit est Ri^2 ; égalant l'action chimique de la pile à la chaleur dégagée dans le circuit, on a : $nJ\theta ai = Ri^2$, d'où $i = \frac{nJ\theta a}{R}$.

Mais E étant la force électro-motrice d'un élément, on a, d'après la loi de Ohm, $i = \frac{nE}{R}$, d'où $E = J\theta a$.

La force électro-motrice est donc, en mesure absolue, l'équivalent de l'action chimique correspondante au passage de l'unité de courant, c'est-à-dire de l'action chimique produite par la dissolution de un équivalent électro-chimique du métal attaqué.

Nécessité de la polarisation des électrodes. — Plaçons un électrolyte dans le circuit : a' étant l'équivalent électro-chimique du composé dissous, θ' la quantité de chaleur nécessaire pour décomposer 1 gramme de ce composé, le poids décomposé pendant l'unité de

temps est $\alpha'i$ et la chaleur absorbée $\alpha'o'i$. L'action chimique de la pile est égale ici à la chaleur dégagée dans le circuit, plus celle qui a servi à décomposer l'électrolyte. On a donc :

$$nJ\theta ai = Ri^2 + J\theta'o'i$$

d'où
$$i = \frac{Jn\theta a - J\theta'o'}{R}$$

Conséquences : 1° La présence de l'électrolyte diminue l'intensité du courant autrement que par sa résistance qui est comprise dans R : elle produit une diminution de la force électro-motrice totale, ou engendre une force électro-motrice inverse. C'est l'explication de la *polarisation*.

2° E' étant la force électro-motrice de polarisation on a $i = \frac{E-E'}{R}$, d'où $E' = J\theta'a'$. La force électro-motrice de polarisation est donc l'équivalent mécanique de la décomposition d'un équivalent électro-chimique de l'électrolyte. Si elle varie cependant avec l'intensité du courant, c'est que dans l'électrolyse les produits immédiats ne sont pas les éléments à l'état libre, mais les éléments condensés sur les électrodes ; c'est cet état de condensation qui varie avec l'intensité du courant.

3° Pour que le courant passe, il faut que $n\theta a > \theta'a'$, c'est-à-dire que l'action chimique de la pile soit plus grande que celle de l'électrolyte. En donnant à n une valeur convenable, on peut toujours opérer la décomposition.

4° Si, en même temps que le liquide se décompose, il se régénère par l'action d'un des éléments de la dissolution sur l'électrode correspondante, la somme des actions chimiques dans l'appareil de décomposition est nulle ; on sait en effet qu'il n'y a pas alors de polarisation. C'est le cas du sulfate de cuivre décomposé avec des électrodes de cuivre : l'absorption de la chaleur produite par la décomposition d'un équivalent de sel est exactement compensée par le dégagement de chaleur résultant de la formation d'un équivalent de sulfate à l'électrode positive.

Nécessité des phénomènes d'induction. — Si le courant engendre des effets mécaniques proportionnels à son intensité, on pourra représenter l'énergie consommée dans l'unité de temps par $E'i$ et l'on aura :

$$nJ\theta ai = Ri^2 + E'i$$

ou
$$Ei = Ri^2 + E'i$$

d'où $i = \frac{E-E'}{R}$, E' est la force électro-motrice d'induction.

APPLICATIONS.

Connaissant le nombre de calories dégagées ou absorbées dans une réaction chimique, la relation $E = J\theta A$ permettra de calculer la force électro-motrice équivalente en mesure absolue. Les déterminations expérimentales qui ont été faites donnent le nombre de calories θA rapporté à l'équivalent chimique A . Mais on a vu que, pour décomposer un équivalent chimique d'une substance, il fallait 9505 unités absolues magnétiques C. G. S.

On aura donc, en mesure magnétique, $a = \frac{A}{9505}$, d'où $E = \frac{J\theta A}{505}$.

et comme $J = 4,2 \times 10^7$, $E = 4,4 \times 10^4 \theta A$.

En divisant par $v = 3 \times 10^{10}$, on aura la force électro-motrice e en mesure statique C. G. S.

Quand il y a dans le circuit une série d'actions chimiques, les unes dégageant, les autres absorbant de la chaleur, on affecte le nombre de calories correspondant du signe + ou -- et la somme algébrique donnera la valeur de θA , qui correspond à la force électro-motrice totale.

Ainsi, dans la pile Daniell, l'oxydation de 1 équivalent de zinc produit 42570 calories, la combinaison de 1 équivalent d'oxyde avec l'acide sulfurique 12304 : la somme 54874 représente le nombre de calories dégagées par la formation de 1 équivalent de sulfate de zinc ; mais, d'autre part, la décomposition de 1 équivalent de sulfate de cuivre absorbe 29372 calories : la différence $54874 - 29372 = 25502$ donne la valeur de θA pour l'élément Daniell.

On trouve ainsi $E = 112000000$ u. magnétiques C. G. S. = 1,12 volts et $e = 0,00374$ u. statiques C. G. S., ce qui est le nombre trouvé directement par sir W. Thomson (vol. I, p. 268 et 523).

La décomposition de l'eau exige 34462 calories, c'est-à-dire une chaleur supérieure à celle de l'action chimique de l'élément Daniell. Un seul élément Daniell ne peut donc pas décomposer l'eau. Il n'a pas été tenu compte de la décomposition de l'eau par le zinc dans l'élément Daniell, car elle a été compensée par la recombinaison de l'hydrogène avec l'oxygène de l'oxyde de cuivre.

CHAPITRE XXXIX

BATTERIES SECONDAIRES. — MACHINE RHÉOSTATIQUE

Lorsqu'on prolonge le passage d'un courant dans un voltamètre, les lames acquièrent une sorte de polarisation électrolytique ; si on enlève ensuite la pile, et qu'on réunisse les lames par un fil métallique, on observe dans le fil un courant en sens inverse du courant de la pile.

Lorsque les lames du voltamètre ont une grande surface, elles mettent un temps plus long à se polariser, mais le courant inverse ou *secondaire* est extrêmement intense. Le courant secondaire ne dure qu'un temps très court, mais la quantité d'électricité qui passe est égale à la quantité totale emmagasinée, qui a été fournie par la pile pendant un temps beaucoup plus long ; par conséquent, pendant sa durée, le courant secondaire sera beaucoup plus intense que le courant de la pile ou courant *primaire*.

On a tiré parti de ce fait dans la construction de *batteries secondaires* qui, avec deux ou trois éléments de Grove ou de Bunsen, permettent d'obtenir, pendant un temps court, des effets égaux à ceux que l'on ne pourrait obtenir directement qu'en employant plusieurs centaines d'éléments.

RECHERCHES DE PLANTÉ

Les recherches les plus importantes dont les batteries secondaires aient été l'objet, sont celles de M. Gaston

Planté (1), actuellement (février 1880) en cours de publication.

L'élément secondaire dont il se sert est représenté dans la figure 275. Il se compose de deux grandes feuilles de plomb, d'un peu plus d'un mètre carré de surface, enroulées en spirale, séparées l'une de l'autre par des bandes étroites de gutta-percha et plongeant dans de l'eau acidulée

au $\frac{1}{10}$ par l'acide sulfurique (2). Un certain nombre de ces éléments secondaires sont accouplés pour former une batterie secondaire.

M. Planté a aussi construit des batteries formées d'une série de lames de plomb plates et parallèles, plongeant dans l'eau acidulée, et reliées alternativement comme les plaques d'un condensateur (3).

Une batterie secondaire, composée de six lames de 0^m,20 de longueur sur 0^m,22 de hauteur et présentant une surface de un demi-mètre carré environ (car toutes les surfaces doubles sont utilisées, sauf celles des lames extrêmes), après avoir été excitée par deux élé-

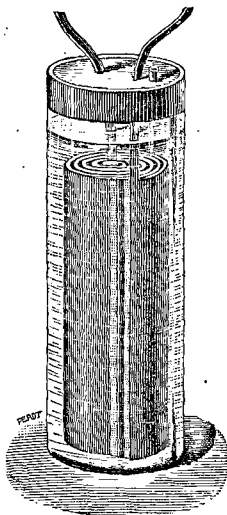


FIG. 275.

(1) *Recherches sur l'électricité*, par Gaston Planté (Paris : A Fourneau) : tome I, 14 février 1879; tome II, fascicule I, 30 septembre 1879; tome II, fasc. II, 16 octobre 1879.

(2) Planté, tome I, p. 35. [L'énergie de ces éléments tient à ce qu'il se forme à l'électrode positive du peroxyde de plomb, qui a une grande affinité pour l'hydrogène et se décompose rapidement, en donnant naissance au courant de polarisation, quand le courant principal a cessé de passer et que le circuit secondaire est fermé.]

(3) Planté, tome I, p. 37.

GORDON. *Electricité*.

ments Bunsen, fournissait un courant secondaire capable de chauffer au rouge des fils de fer, d'acier ou de platine de un millimètre de diamètre.

« FORMATION » DES LAMES

On a constaté que les lames, après avoir servi quelque temps, donnaient de meilleurs résultats que lorsqu'elles étaient neuves. L'examen des conditions qui pouvaient améliorer leur action a conduit M. Planté (1) à la découverte d'une méthode de *formation* des lames, c'est-à-dire d'une méthode de préparation des lames réalisant les meilleures conditions pour la production des effets voulus.

Des éléments Daniell, même en grand nombre, ne *forment* pas si bien les couples secondaires que deux ou trois éléments de Bunsen ou de Grove (2).

Voici la marche à suivre :

On charge le couple secondaire, le premier jour que l'on s'en sert, cinq ou six fois, alternativement dans les deux sens, et on le décharge entre chaque changement de sens du courant primaire.

On constate que la durée du courant secondaire augmente après chaque changement de sens (3).

On donne aux six charges les durées indiquées dans la table suivante, où l'un des sens du courant est désigné par le signe (+) et l'autre sens par le signe (—) :

(1) Planté, tome I, p. 49-55.

(2) Sans doute à cause de la résistance des éléments Daniell.

(3) [Ces alternatives d'oxydation du métal et de réduction de l'oxyde antérieurement formé ont pour effet de donner aux lames un état moléculaire qui facilite l'action du courant suivant : les couches d'oxyde alternativement formées ou réduites deviennent plus épaisses, et les effets secondaires augmentent en durée et en intensité.]

1°	Courant +	pendant	$\frac{1}{4}$	d'heure,
2	»	—	»	$\frac{1}{4}$ »
3	»	+	»	$\frac{1}{2}$ »
4	»	—	»	$\frac{1}{2}$ »
5	»	+	»	1 »
6	»	—	»	1 »

Après la dernière charge, l'élément secondaire n'est pas déchargé; on le laisse chargé (—) jusqu'au lendemain.

Le lendemain, on le recharge deux heures en sens inverse (+), puis dans l'autre sens (—), et ainsi de suite; mais il arrive une limite au-delà de laquelle la durée du courant secondaire n'éprouve plus d'accroissement sensible.

On laisse alors l'élément chargé (—) au repos, pendant 8 jours; on le recharge alors en sens inverse (+), pendant plusieurs heures, sans faire, le même jour, de nouveaux changements de sens. Puis, on porte peu à peu l'intervalle de repos à quinze jours, un mois, deux mois, etc. et la durée de la décharge va sans cesse en augmentant; elle n'a d'autre limite que l'épaisseur même des lames de plomb (1).

(1) [La lame positive est alors en partie transformée en peroxyde de plomb à texture cristalline et la lame négative est formée, jusqu'à une certaine profondeur, de plomb réduit, grenu et cristallin. Il ne faut pas pousser trop loin cette préparation, car les couples finissent par devenir plus résistants et exigent plus de temps pour être chargés. Lorsque les couples secondaires donnent un courant d'une durée suffisante pour l'application qu'on veut faire, il n'y a plus lieu de changer le sens du courant primaire chaque fois qu'on s'en sert, car la couche de peroxyde de plomb serait trop longue à réduire. Une fois les couples suffisamment *formés*, on adopte un sens définitif dans lequel on les charge toujours.

Quand on charge les couples secondaires ainsi préparés, on n'observe aucun dégagement de gaz pendant un certain temps: les gaz sont absorbés, en effet, par l'oxydation du plomb, d'une part, et, d'autre part, par la réduction du plomb oxydé produit par la fermeture antérieure du courant secondaire. Lorsque les gaz commencent à se dégager dans un couple secondaire *préalablement bien formé*, on est averti que le couple a atteint son maximum de charge.]

Le succès de cette méthode paraît tenir à la pénétration de l'action électrolytique dans l'intérieur des lames; les intervalles de repos sont nécessaires pour donner aux couches cristallines, dont on observe la formation dans l'épaisseur même du métal, le temps de durcir et d'adhérer fortement à la surface des lames avant le changement de sens du courant.

ACCOUPLÉMENT EN SÉRIE OU EN SURFACE

Un certain nombre d'éléments secondaires peuvent être associés en *série* ou en *surface*, exactement de la même manière qu'un certain nombre d'éléments ordinaires de piles, et on obtient exactement les mêmes résultats.

EFFETS CALORIFIQUES DES COURANTS SECONDAIRES

En associant en *surface* quatre ou cinq éléments, et en les déchargeant à travers un fil de fer gros et court, on a un globule fondu comme celui représenté dans la figure 276.

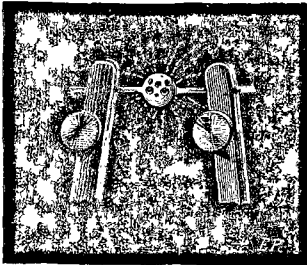


FIG. 276.

La surface du globule incandescent paraît *en ébullition* et parsemée de taches produites par des bulles gazeuses qui viennent de l'intérieur de la masse.

Ces bulles se développent très rapidement, et généralement finissent par percer l'enveloppe de fer liquide qui les entoure, en projetant des parcelles incandescentes. Quelquefois, cependant, le fil fond d'abord, le globule se refroidit et est préservé.

EFFETS MAGNÉTIQUES

Les courants secondaires aimantent les électro-aimants beaucoup plus fortement que les courants primaires dont ils dérivent.

DURÉE DES COURANTS SECONDAIRES (1)

Les courants secondaires ont une durée plus grande lorsque les lames ont été bien *formées* que lorsqu'elles sont neuves.

Leur durée dépend aussi de la résistance du conducteur que doit traverser le courant de décharge, et est évidemment d'autant plus longue que cette résistance est plus grande.

La décharge d'un couple peut rougir un fil de platine de 1 millimètre de diamètre, de 1 à 10 minutes, selon le degré de sa *formation*.

Avec un couple qui ne donnerait, en employant un gros fil de platine, qu'une incandescence de quelques minutes, on peut obtenir l'incandescence, prolongée pendant une heure, d'un fil de platine de $\frac{1}{3}$ de millimètre de diamètre.

CONSTANCE DU COURANT

Quand la résistance est grande, le courant reste sensiblement constant pendant la durée de la décharge : il n'accuse de diminution d'intensité qu'un peu avant de cesser tout à fait (2).

(1) Planté, tome I, p. 65.

(2) [Ce fait prouve la *grande capacité* du couple : il emmagasine une grande quantité d'électricité à un potentiel relativement faible. De même qu'un vase très large contenant une grande quantité de liquide, sous une très faible hauteur, fournit pendant longtemps, par un petit orifice, un écoulement à peu près constant et cessant très rapidement dès que le liquide arrive au-dessous du niveau de l'orifice, de même un couple secondaire de grande surface n'accuse de diminution d'intensité que quelques instants avant de cesser complètement de fournir de l'électricité.]

CONSERVATION DE LA CHARGE

Un couple secondaire bien *formé* donne encore un fort courant deux ou trois semaines après avoir été chargé.

FORCE ÉLECTRO-MOTRICE

La force électro-motrice d'un couple est comprise entre 1,45 et 1,50 fois celle d'un élément Bunsen, c'est-à-dire d'environ 2,5 Volts (1).

TRANSFORMATION DU COURANT D'UNE PILE VOLTAIQUE
AU MOYEN D'UNE BATTERIE SECONDAIRE (2)

Pour obtenir des courants d'un potentiel élevé, on associe un certain nombre d'éléments secondaires en *surface*, et on les charge; puis on les associe en série. La figure 277

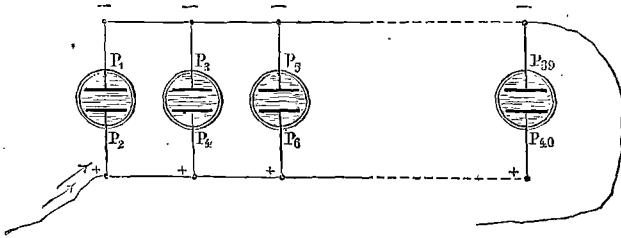


FIG. 277.

montre la disposition d'une batterie de 40 couples quand

(1) [La résistance des divers modèles varie de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{20}$ de Ohm.

M. Planté a mesuré le rapport de la quantité d'électricité *restituée* par la décharge à celle *dépensée* par la charge. Il interpose, pendant toute la durée de la charge (c'est-à-dire jusqu'à l'apparition des gaz), un voltamètre à sulfate de cuivre dans le circuit comprenant la pile primaire et un couple secondaire *bien formé*; puis il décharge ce couple à travers un autre voltamètre, jusqu'à ce que le couple soit épuisé. Le *rendement* a été trouvé de 88 à 89 pour cent.]

(2) Planté, tome I, p. 93.

on la charge. On change ensuite les communications de façon à obtenir la disposition de la figure 278; les diffé-

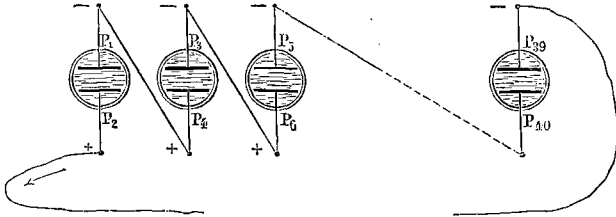


FIG. 278.

rences de potentiel données séparément par chaque élément s'ajoutent alors et produisent une grande différence de potentiel aux extrémités de la pile.

La figure 279 représente un mécanisme ingénieux qui permet d'effectuer rapidement ce changement de commu-

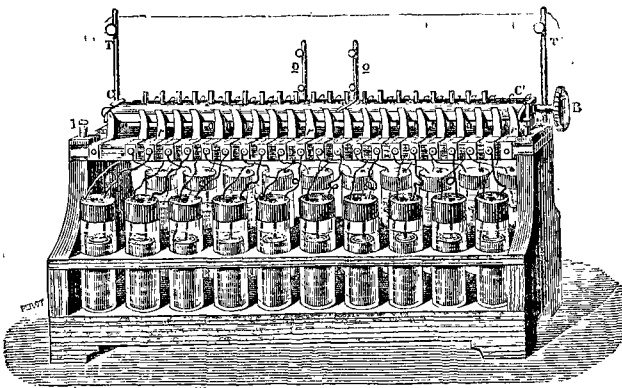


FIG. 279.

nications. Une règle de bois CC' , que l'on peut faire tourner au moyen d'un bouton B , est garnie de chaque côté de bandes en cuivre (on voit de face l'une de ces bandes), et

est traversée par de courtes fiches de cuivre (que l'on aperçoit verticales). Pour charger, on tourne la règle dans la position indiquée par les figures 279, 280 : les ressorts reliés à tous les pôles négatifs appuient sur l'une des bandes, et ceux reliés à tous les pôles positifs appuient sur l'autre.

Pour réunir les couples en série, on tourne le bouton B de 90 degrés : chaque ressort est alors relié par une des fiches de cuivre au ressort opposé, comme le montre la figure 281. TT' sont des pinces

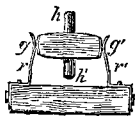


Fig. 280.

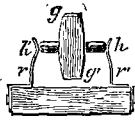


Fig. 281.

reliées aux pôles extrêmes de la batterie, et permettant de rougir ou de fondre des fils métalliques longs et fins ; QQ' sont des pinces communiquant

avec les bandes en cuivre de la règle pour faire rougir ou fondre des fils métalliques gros et courts.

Avec une grande batterie secondaire, composée de 800 couples (20 batteries de 40 couples), on a obtenu des effets lumineux très curieux. En associant les couples en surface, elle était chargée tout entière par deux éléments Bunsen : quelques heures suffisent pour la charge, quand les batteries qui la composent ne sont pas restées trop longtemps sans fonctionner. En tournant les commutateurs, on peut ensuite associer tous les couples en tension et dépenser, à son gré, en quelques secondes ou quelques minutes, la quantité d'électricité accumulée pendant plusieurs heures de charge.

Avec une batterie secondaire de 200 couples, on pouvait porter au rouge un fil de platine de $\frac{3}{10}$ à $\frac{4}{10}$ de millimètre de diamètre sur 10 mètres de longueur.

DÉCHARGE DANS LES TUBES A VIDE

Une batterie secondaire de 800 couples illumine un tube à vide de très grande *résistance* pendant trois heures et demie ou plus, sans avoir besoin d'être rechargée. La décharge présente de belles stratifications (1).

MACHINE RHÉOSTATIQUE (pl. XLIX)

Le succès obtenu par M. Planté dans ses expériences avec les batteries secondaires l'a amené à construire une *machine rhéostatique* (2) pour transformer l'électricité voltaïque en électricité de haut potentiel.

Cette machine se compose d'un certain nombre de condensateurs formés de mica et de feuilles d'étain, disposés comme les couples des batteries secondaires, de manière à pouvoir être successivement chargés en *surface* et déchargés en *série*.

Comme on peut charger et décharger très rapidement ces condensateurs, on tourne la manivelle d'une façon continue, et on obtient un écoulement continu d'étincelles (3).

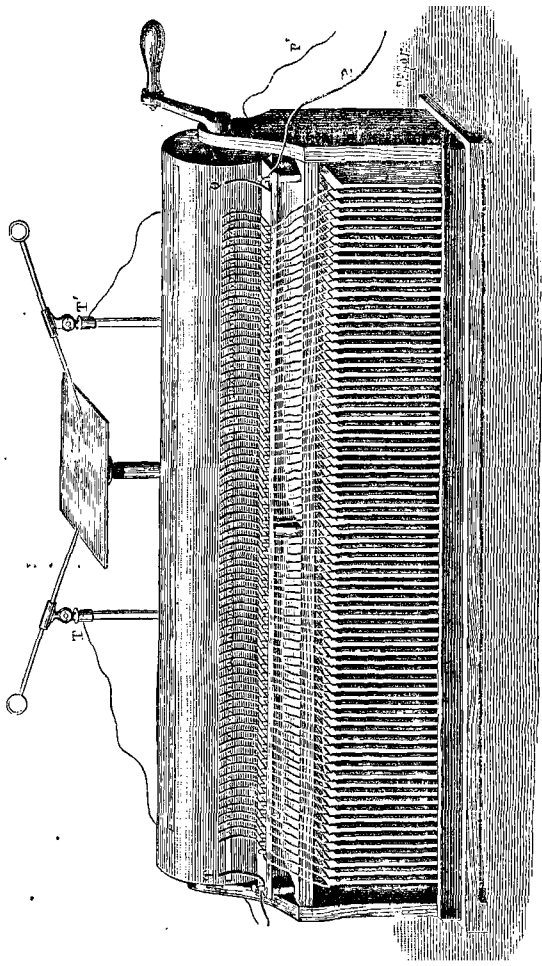
La planche XLIX représente une grande machine rhéostatique comprenant 80 condensateurs. Le cylindre placé au sommet a 1 mètre de longueur sur 0^m,15 de diamètre, et la machine donne des étincelles de 12 centimètres.

Par des expériences faites en employant des parties seu-

(1) Planté, tome I, p. 259.

(2) Planté, tome I, p. 252; tome II, p. 2.

(3) [On peut maintenir longtemps l'appareil en rotation et produire un nombre considérable de décharges sans que la batterie secondaire paraisse sensiblement affaiblie. Cela vient de ce que chaque décharge n'enlève qu'une quantité très minime d'électricité et que le circuit de la batterie n'est pas fermé par un corps conducteur.]



Pl. XLIX. — Machine rhéostatique de Planté.

lement de la machine, M. Planté a reconnu que la longueur des étincelles était proportionnelle au nombre des condensateurs.

La longueur de l'étincelle croît avec le nombre des éléments de la pile de charge, et croît plus vite que le nombre d'éléments; mais M. Planté n'a pu déterminer la loi exacte que suit cet accroissement (1).

La machine rhéostatique était chargée au moyen d'une batterie de 600 à 800 couples secondaires. M. Planté ne pense pas que cette machine soit d'un usage bien pratique, mais elle offre un intérêt théorique considérable.

MACHINE RHÉOSTATIQUE DE QUANTITÉ (2).

M. Planté a disposé aussi une machine rhéostatique pour la production d'effets de *quantité*. Comme la machine déjà décrite, elle a ses condensateurs associés en *surface* pour la charge de la machine par la batterie secondaire; mais elle est munie d'un commutateur disposé différemment, afin que les condensateurs se déchargent aussi en surface et non plus en série.

Le commutateur (fig. 282, 283) recueille les décharges des condensateurs réunis en surface, sans mélange avec la décharge directe de la batterie secondaire.

Un petit cylindre en caoutchouc durci porte 4 bandelettes de cuivre, opposées deux à deux, occupant chacune les $\frac{2}{3}$ de la longueur du cylindre; deux d'entre elles, *mn* et *op*, sont visibles sur les figures. 6 ressorts BCE, B'C'E', également opposés deux à deux, frottent contre le cylindre.

(1) [Il pense que la longueur doit varier comme le carré du nombre des éléments, suivant la loi de MM. de la Rue et Müller pour l'étincelle directe d'une pile à haute tension.]

(2) Planté, II, p. 23.

La paire de ressorts BB' communique avec la batterie secondaire; la paire CC' avec les deux pôles de la charge de la machine rhéostatique (pl. XLIX), dont le commutateur est préalablement tourné dans la position où les condensateurs sont associés en surface. La paire de ressorts EE' communique avec un excitateur ou tout autre appareil dans lequel on veut faire passer les décharges.

Dans la position du commutateur représentée par la figure 282, la pile est reliée à la machine rhéostatique et charge les condensateurs.

Dans la position du commutateur représentée par la

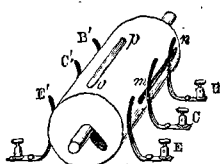


FIG. 282.

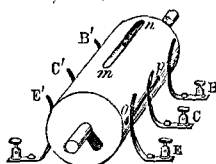


FIG. 283.

figure 283, les pôles de la pile sont isolés, et les condensateurs sont reliés aux ressorts EE' du circuit de décharge.

En faisant tourner rapidement le cylindre, on obtient une série presque continue de décharges.

Ce commutateur, au lieu d'être muni d'un mouvement de rotation particulier, est ordinairement adapté à la machine elle-même ($a'b'$, fig. 284).

Quand on veut se servir de la machine en *quantité*, on soulève la goupille K , qui rend indépendants les deux cylindres et permet de faire tourner $a'b'$, tandis que ab reste au repos.

Quand on veut se servir de la machine en *série*, on enfonce K , qui réunit les deux cylindres, et fait tourner ab en même temps que $a'b'$, et la machine fonctionne exacte-

ment comme celle décrite plus haut (page 345). Quoique le

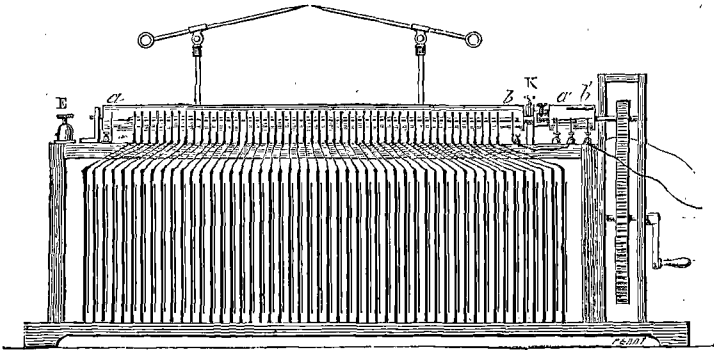


FIG. 284.

cylindre court $\alpha' b'$ tourne également, il n'accomplit plus aucune fonction.

DÉCHARGE DE LA MACHINE DE « QUANTITÉ »

On obtient une série continue d'étincelles brillantes, mais d'une longueur de $\frac{2}{10}$ à $\frac{3}{10}$ de millimètre seulement, c'est-à-dire beaucoup plus courtes que celles fournies par la décharge directe de la batterie secondaire.

L'étincelle cependant est beaucoup plus brillante et plus violente que celle de la décharge directe.

La différence entre les décharges de la batterie secondaire avec et sans machine de quantité est tout à fait analogue à la différence entre les décharges d'une bobine d'induction avec ou sans bouteille de Leyde (1).

EFFETS CALORIFIQUES

L'effet calorifique de la machine rhéostatique disposée en

(1) Vol. II, p. 117.

quantité est beaucoup plus grand que quand elle est disposée en série.

EFFETS MÉCANIQUES

Les effets mécaniques de la machine de quantité sont très remarquables.

Si la machine est reliée à un voltamètre, le passage de chaque étincelle à travers le liquide conducteur est accompagné d'un bruit très fort semblable à une petite explosion.

NŒUDS DE VIBRATION FORMÉS DANS UN FIL MÉTALLIQUE

Si l'on envoie le courant de la machine de quantité à travers un fil fin de platine (*ab*, fig. 285) de $\frac{1}{20}$ de millimètre environ de diamètre et de 40 centimètres de long, on voit

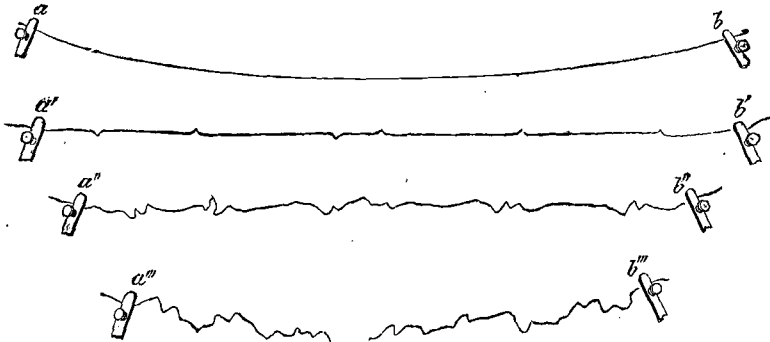


FIG. 285.

apparaître sur toute la longueur du fil et à des distances semi-régulières une série d'angles aigus *a'b'*.

Si on rapproche les pinces entre lesquelles le fil est fixé, de manière à détendre le fil, il se forme de nouveaux angles, et le fil prend la forme *a''b''*.

Si on raccourcit le fil de manière à le réduire à 0^m,10 de

longueur, il rougit au blanc en offrant des angles tellement accentués, $a'''b'''$, qu'il présente l'aspect d'une étincelle électrique continue.

BRUIT DANS LE FIL

La décharge à travers le fil est accompagnée d'un craquement continu, analogue à celui d'une étincelle qui se produirait dans le fil lui-même, bien que ce fil ne présente aucune solution de continuité.

FRAGILITÉ DU FIL

Le fil devient très cassant à la suite du passage de la décharge. Si l'expérience dure plus de deux minutes, il se brise spontanément.

CONCLUSION

Voici la conclusion de M. Planté :

« Les phénomènes que nous venons de décrire sont de nature à jeter quelque jour sur le mode de propagation de l'électricité. Les vibrations moléculaires révélées par les nœuds formés dans un fil métallique, par le bruit perçu et par le changement notable de sa cohésion, sous l'influence du passage du courant *dynamo-statique*, que nous venons d'étudier, doivent se produire à un moindre degré, dans les corps conducteurs traversés par des courants électriques de moindre tension. Ces vibrations peuvent être trop faibles pour être perceptibles, mais elles n'en sont pas moins réelles.

» Nous croyons donc pouvoir conclure que le *mouvement électrique* doit se propager dans les corps à la manière du *mouvement mécanique* proprement dit, par une série de vibrations très rapides de la matière plus ou moins élastique qu'il traverse. »

CHAPITRE XL

MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES ET MACHINES ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES (1)

Si l'électricité peut produire du magnétisme (électro-aimant), inversement le magnétisme doit pouvoir produire de l'électricité. C'est ainsi que Faraday fut conduit à la découverte de l'induction électro-magnétique. On a vu (vol. I, p. 581 et vol. II, p. 1) que le mouvement relatif d'un aimant et d'un circuit fermé engendre, dans ce circuit, des courants dont le sens est déterminé par la loi de Lenz. On obtient les mêmes effets en laissant à demeure, dans l'intérieur de la bobine, un noyau de fer doux qu'on aimante ou désaimante alternativement à l'aide d'un aimant permanent. Tel est le principe des machines *magnéto-électriques* (2).

Toute machine de ce genre se compose de deux parties : l'*inducteur*, qui est le système d'aimants (ou électro-ai-

(1) Ce chapitre et le suivant ont été complètement refaits et ont reçu des développements en rapport avec l'importance des sujets et leur caractère d'actualité. Nos renseignements ont été pris directement ou puisés dans les traités spéciaux, tels que : *l'Éclairage par l'électricité*, par M. Fontaine (Baudry, éditeur); *l'Éclairage électrique*, par M. du Moncel (Hachette); *Les principales applications de l'électricité*, par M. Hospitalier (Masson); la collection du journal *La lumière électrique*, etc. J. R.

(2) Au lieu de disposer l'hélice induite autour du noyau de fer doux, on peut aussi l'enrouler autour de l'aimant permanent et faire mouvoir en regard de ce dernier une armature de fer doux (appareils médicaux de Dujardin, de Breton, de Duchenne et le téléphone magnétique). Le fer doux s'aimante temporairement, et cette aimantation réagit sur l'aimant permanent, dont l'état magnétique éprouve des variations qui développent des courants induits dans l'hélice enveloppante. L'appareil médical de Gaiffe réunit les deux dispositions.

mants) qui produit le champ magnétique; et l'*induit* ou *armature* qui est le système de bobines dans lequel se développe le courant induit. Quand le champ magnétique est produit par des électro-aimants, on désigne les machines sous le nom de *dynamo-électriques*, pour les distinguer de celles où entrent des aimants permanents.

Comme il ne s'agit que d'un mouvement relatif, tantôt c'est l'inducteur qui est fixe et l'induit qui se meut dans le champ magnétique créé par l'inducteur; tantôt, c'est l'inducteur qui est mobile et l'induit qui est fixe.

Les courants ainsi obtenus sont *alternatifs*; mais on peut les diriger tous dans le même sens à l'aide de *commutateurs* ou *collecteurs* convenables. De là, les dénominations de *machines à courants alternatifs* et de *machines à courant continu*, ces dernières ne différant d'ailleurs des premières que par l'adjonction des commutateurs ou collecteurs.

Le mouvement relatif, qui est indispensable à la production du courant dans les machines magnéto et dynamo-électriques, est donné par un moteur mécanique. On peut donc dire que ces machines *transforment l'énergie mécanique* dépensée par le moteur *en énergie électrique*.

Inversement, on peut *transformer l'énergie électrique en énergie mécanique*, ou animer des moteurs par l'électricité. C'est l'objet des machines *électro-magnétiques*, ou *moteurs électriques*.

MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES

Machines de Pixii, Saxton et Clarke.

Dans la machine de *Pixii*, construite un an après la découverte de Faraday, l'induit est fixe et l'inducteur mobile.

L'induit est un électro-aimant vertical à deux branches, fixé par sa culasse à une potence, ses pôles en bas. L'inducteur est un aimant vertical en fer à cheval, pouvant tourner rapidement autour d'un axe parallèle à ses branches et présentant ses tranches polaires aux pôles de l'électro-aimant, de telle sorte qu'elles rasant ceux-ci

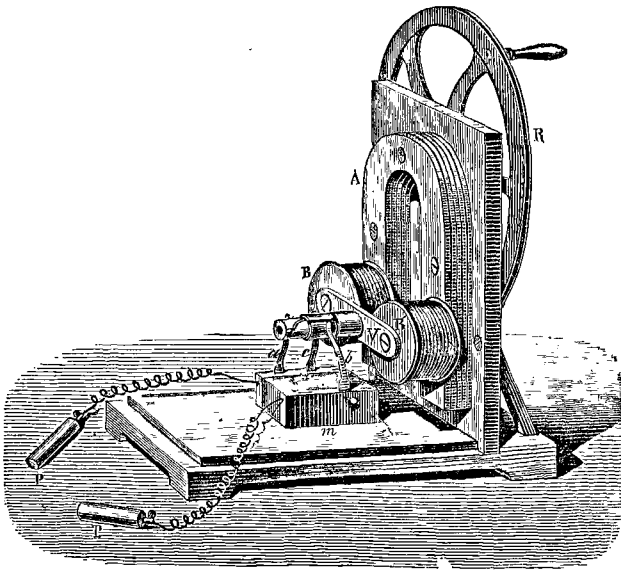


FIG. 286. — Machine de Clarke

sans les toucher. *Saxton* disposa horizontalement l'aimant et l'électro-aimant, placés toujours bout à bout; de plus, il rendit l'aimant inducteur fixe et l'électro-aimant mobile. *Clarke*, en 1834, fit tourner l'électro-aimant horizontal, non plus devant la tranche, mais devant le plat des parties polaires de l'aimant, placé alors verticalement (fig. 286), et ajouta un commutateur (fig. 287 et 288), pour donner la

même direction aux courants alternatifs qui se développent à chaque demi-révolution (1).

(1) Les fils des bobines de l'électro-aimant sont disposés soit en *série*, soit *parallèlement*, comme dans la fig. 287, suivant que le circuit extérieur est

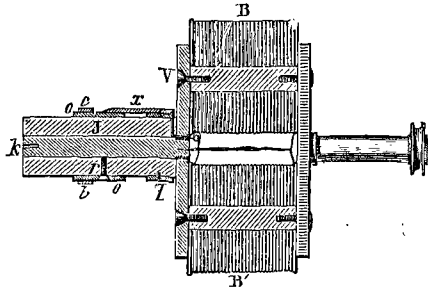


FIG. 287.

très résistant (effets physiologiques) ou peu résistant (effets calorifiques ou chimiques). Le sens de l'enroulement est indifférent; mais il faut réunir les fils de telle sorte que les courants inverses, qui prennent naissance au même instant dans les deux bobines, circulent dans l'une de droite à gauche et dans l'autre de gauche à droite, pour ne pas se contrarier. Les deux bouts libres aboutissent l'un à l'axe de cuivre *k*, l'autre à la virole de cuivre *q*, isolée de *k* par le cylindre d'ivoire *J*. Pendant une demi-révolution, chaque noyau de fer doux est successivement aimanté quand il passe devant un pôle, puis désaimanté, et réaimanté en sens inverse quand il passe devant l'autre pôle: l'effet est le même que si l'on retirait un aimant placé dans la bobine pour le réintroduire ensuite en sens inverse, et par suite les courants induits sont d'intensité variable, mais de même sens. Dans la seconde demi-révolution, le courant est inverse du précédent. Par conséquent les bouts des fils aboutissant en *k* et *q* sont alternativement + et —. Le mouvement des bobines sans noyau de fer doux donnerait des courants semblables, mais plus faibles.

Le *commutateur* est placé en avant de la virole *q*: les deux demi-anneaux de laiton *o* et *o'*, isolés l'un de l'autre, sont reliés l'un à *q* par la languette *x*, l'autre à *k* par la vis *r*. Les plaques de laiton *m* et *n*, séparées par le bloc isolant *M*, communiquent par les ressorts *b* et *c* avec l'une des pièces *o* ou *o'*, disposées de telle sorte qu'elles quittent un des ressorts pour toucher l'autre au moment du changement de sens des courants induits. En reliant *m* et *n* par un conducteur *p*, on a donc un courant continu, de direction constante, mais dont l'intensité présente des variations périodiques à chaque demi-tour.

Pour obtenir des commotions énergiques, on ajoute à l'appareil un *disjonc-*

Machines de l'Alliance et de Holmes.

Au lieu d'une seule paire de bobines et d'un seul aimant en fer à cheval, on peut avoir un certain nombre de bobines disposées sur la circonférence d'un plateau qui, en tournant autour d'un axe horizontal, les amène successivement en présence d'un nombre égal de pôles alternatifs disposés aussi en cercle dans un plan parallèle à celui du plateau et appartenant à une série d'aimants fixes en fer à cheval. Ou mieux encore, on peut faire tourner le plateau portant les bobines entre deux couronnes parallèles d'aimants fixes, présentant en regard leurs pôles contraires, afin de donner

leur composé de deux appendices diamétralement opposés *i*, communiquant chacun avec le demi-anneau opposé. Chaque fois que le ressort *a* (fig. 286) touche un des appendices, il communique avec le demi-anneau que presse le

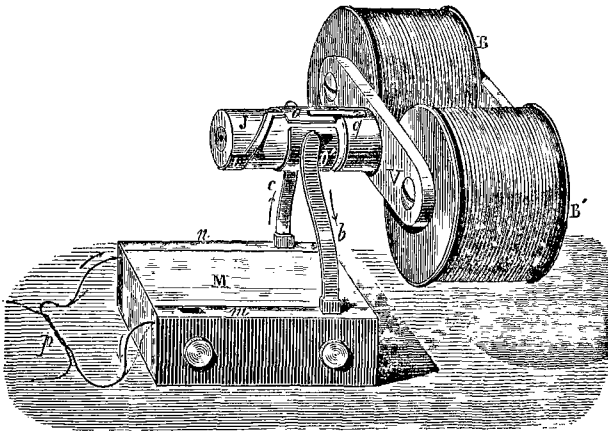
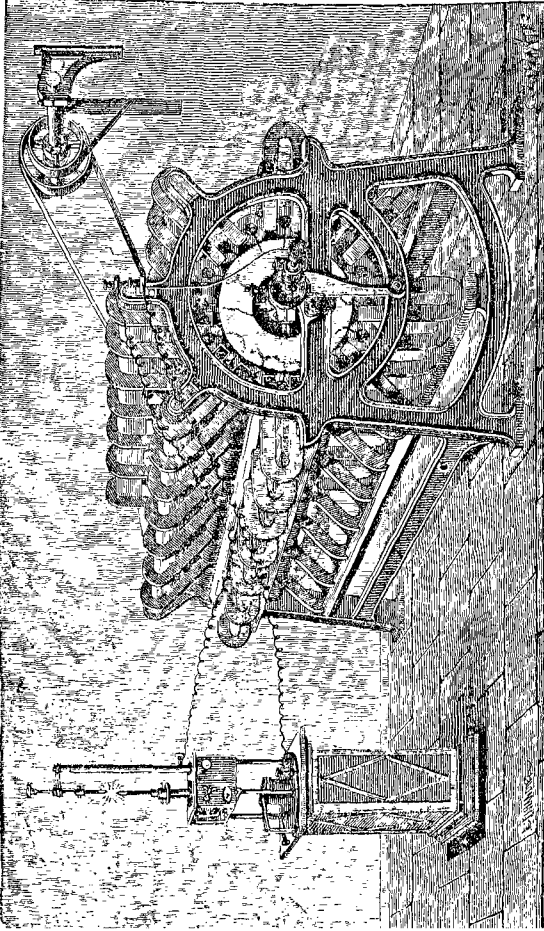


FIG. 288.

ressort opposé *b*. Le circuit est fermé alors par *n*, mais, dès que *a* cesse de toucher un appendice, ce circuit local est ouvert et le courant, renforcé de l'extra-courant de rupture, passe dans le circuit extérieur constitué par les rhéophores et les excitateurs PP appliqués au sujet.



Pl. L. — Machine de l'Alliance.

des polarités opposées aux extrémités des noyaux en fer doux des bobines. Les bobines sont enroulées dans le même sens, mais réunies par leurs extrémités contraires, de sorte qu'un même courant les traverse dans des directions opposées ; de cette façon, tous leurs effets s'ajoutent. On peut assembler les bobines en série ou en arc multiple (en tension ou en quantité), suivant qu'on veut une grande force électro-motrice aux pôles ou une faible résistance dans la partie du circuit constituée par la machine (1).

Armature de Siemens.

L'armature ou bobine de Siemens, imaginée en 1854, a été appliquée depuis à un grand nombre d'appareils. C'est un long cylindre de fer doux (fig. 289), évidé de chaque côté parallèlement à l'axe, de sorte que la section transversale (fig. 290) ressemble à un double T. Le fil de cuivre,

(1) Dans la *machine de l'Alliance*, imaginée par Nollet (1850) et perfectionnée par Van Malderen, la partie fixe comprend cinq couronnes parallèles, chacune de huit faisceaux aimantés. La partie mobile comprend quatre plateaux de bronze placés entre les couronnes d'aimants et portant chacun une ceinture de seize bobines. Il y a donc autant de bobines que de pôles d'aimants, et quand l'une est en face d'un pôle, il en est de même des autres. Toutes les bobines d'un même plateau sont reliées en série ; mais les plateaux peuvent être reliés soit en série soit en arc multiple. L'un des pôles extrêmes aboutit à l'arbre central, l'autre à un anneau qui l'enveloppe et tourne avec lui, mais qui en est isolé par du caoutchouc durci. Le courant change de sens chaque fois qu'une bobine passe devant un pôle ; il y a donc 16 changements par tour, ce qui, à raison de 400 tours par minute, fait plus de 100 inversions par seconde. A l'origine, on dirigeait tous les courants dans le même sens à l'aide d'un commutateur, mais les étincelles qui éclatent dans cet organe le détériorent rapidement et sa suppression, pour la production de la lumière électrique, a été considérée comme un grand perfectionnement. Cette machine a été employée en 1863 à l'éclairage des phares de la Hève et plus tard du cap Gris-Nez. Une machine à vapeur de huit chevaux donne le mouvement à deux machines de ce genre.

La machine de Holmes, employée au phare du South-Foreland, est analogue à celle de l'Alliance. Mais, dans la machine primitive de Holmes, imaginée en 1857, les aimants étaient mobiles et les bobines étaient fixes.

garni d'un isolant, est enroulé *longitudinalement* dans les gorges ainsi creusées, et est recouvert de feuilles de laiton qui, avec la partie du fer restée libre, constituent un cylindre complet. La bobine tourne entre les pôles d'une série d'aimants en fer à cheval placés parallèlement. Ces pôles sont munis de pièces de fer S, N, alésées de manière à embrasser très étroitement la bobine, en laissant strictement le jeu nécessaire pour permettre sa rotation. Le mouvement est transmis par la poulie G. Avec cette disposition, les pôles des aimants sont aussi rapprochés que possible de la bobine, qui se trouve alors dans un champ magnétique intense fourni par des aimants relativement petits. Les portions cylindriques de fer doux constituent deux pôles longitudinaux qui

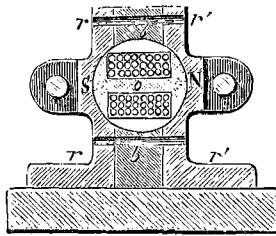


FIG. 290.



FIG. 289.

s'aimantent et se désaimantent comme dans la machine de Clarke et produisent des courants qui changent de sens à chaque demi-révolution. De plus, les fils, dans leur mouvement, coupent les lignes de force magnétique à angles droits sur une grande partie de leur parcours, ce qui donne le maximum d'effet (1).

(1) Représentons en A (fig. 291) une section transversale de l'un des fils de

Si l'on veut recueillir des courants alternatifs, l'un des bouts du fil est soudé à l'axe métallique du cylindre, l'autre à une virole de métal isolée sur le bout de cet axe; des ressorts frotteurs appuient l'un sur l'axe, l'autre sur la virole.

Pour obtenir un courant continu, on emploie un commutateur formé de deux moitiés d'un cylindre, séparées par une section transversale oblique et isolées l'une de l'autre. Les bouts du fil aboutissent à ces deux pièces, contre lesquelles pressent deux ressorts collecteurs, placés symétriquement, qui passent ainsi de l'une à l'autre au moment de l'inversion du courant dans l'armature (1).

Machine Gramme (courant continu).

L'armature de M. Gramme (1870) se compose d'un anneau de fer doux autour duquel est enroulée une hélice de fil de cuivre isolé dont les deux bouts sont soudés en-

la bobine tournante, et supposons que ce fil se meuve dans la direction de la flèche sur un cercle dont le centre est en O, entre les pôles NS d'un aimant en fer à cheval. Tant que le fil est à droite de la ligne EE', il coupe les lignes de force dans une certaine direction, et, quand il passe à gauche de cette ligne, il les coupe dans la direction contraire. Le courant qui passe dans le fil changera donc de sens chaque fois que le fil traversera la ligne EE', ce qui correspond au passage des pôles longitudinaux de la bobine devant les pôles NS des aimants.

(1) Il n'est pas nécessaire qu'une armature fasse un ou plusieurs tours pour obtenir un courant induit : le plus petit mouvement autour de l'axe suffit pour produire une certaine force électro-motrice, puisqu'il change l'intensité du champ dans lequel l'armature est placée. En particulier, avec l'armature de Siemens, il suffit d'un petit déplacement dans un sens ou dans l'autre à partir de la position de la figure 290, pour induire un fort courant + ou -. On a construit sur ce principe des manipulateurs ou clefs pour transmettre des signaux sans employer de pile, ou pour enflammer de la poudre (exploseurs magnétiques).

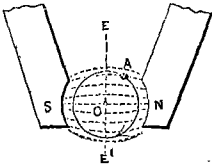


Fig. 291.

semble, de manière à former un fil continu. En faisant tourner cet anneau autour d'un axe central normal à son plan, entre deux pôles d'aimants A et B situés, par exemple, sur un diamètre horizontal, les deux parties de l'hélice situées de part et d'autre du diamètre vertical (c'est-à-dire d'une ligne perpendiculaire à la ligne des pôles) sont parcourues par des courants égaux et opposés, comme si ces deux parties de l'hélice représentaient deux piles égales, assemblées par leurs pôles de mêmes noms. Si le fil

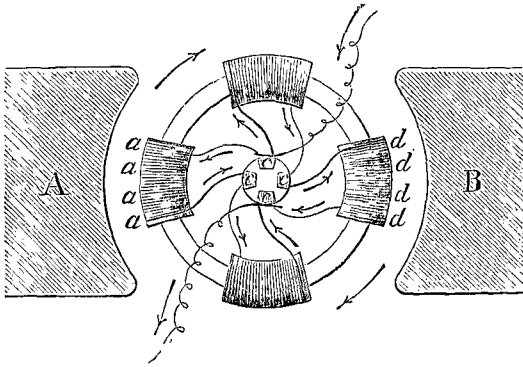


FIG. 292.

est dénudé extérieurement, de façon que la partie nue forme une bande étroite régnant sur toute la surface, et que des frotteurs métalliques pressent sur cette partie nue aux extrémités du diamètre normal à la ligne des pôles, on recueillera ces courants qui s'ajouteront dans un circuit extérieur réunissant les frotteurs, de même qu'on recueille le courant fourni par deux éléments de pile, assemblés par leurs pôles de même nom, dans un circuit extérieur réunissant les pôles communs.

Dans la pratique, un certain nombre de bobines sont embrochées sur l'anneau de fer doux. Chaque bobine (fig. 292)

est reliée à la suivante par l'intermédiaire d'une pièce métallique *c*. Ces pièces, appelées *collecteurs*, en nombre égal à celui des bobines, sont isolées les unes des autres et disposées suivant les génératrices d'un cylindre concentrique à l'axe et tournant avec lui. Deux balais de fils de cuivre, diamétralement opposés, frottent sur ces pièces, et les points de contact sont sur un diamètre perpendiculaire à celui des pôles A et B de l'aimant fixe. La rotation s'effectuant dans le sens des aiguilles d'une montre, les flèches indiquent le sens des courants dans les bobines et montrent que les deux moitiés de l'anneau fournissent des courants qui s'ajoutent dans le circuit extérieur réunissant les deux frotteurs. Entre les quatre bobines de la figure, on peut en intercaler quatre nouvelles, de manière à recouvrir complètement l'anneau de fer. Chaque bobine donne lieu à

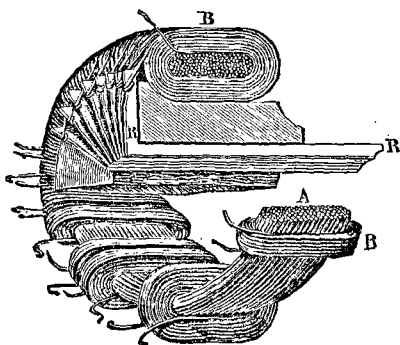


FIG. 293.

une pièce de contact *c*, et chaque pièce de contact à un courant. Il y aura donc autant de courants successifs que de bobines ou de collecteurs. On peut augmenter encore le nombre des bobines dans une proportion quelconque, pourvu que ce nombre soit pair (1).

La figure 293 montre une bobine en partie confectionnée

(1) Les machines de laboratoire contiennent en général 30 bobines, et produisent donc 30 courants par tour, et, comme on peut obtenir plus de 1000 tours par minute, on a 30 000 courants par minute, soit 500 par seconde. Le système de balais flexibles employé pour les frotteurs assure la continuité des courants, car ces balais commencent à toucher une des pièces

avec ses collecteurs R : l'anneau est constitué par un faisceau de fils de fer, afin que l'aimantation et la désaimantation soient plus rapides.

La figure 294 représente une machine de laboratoire à

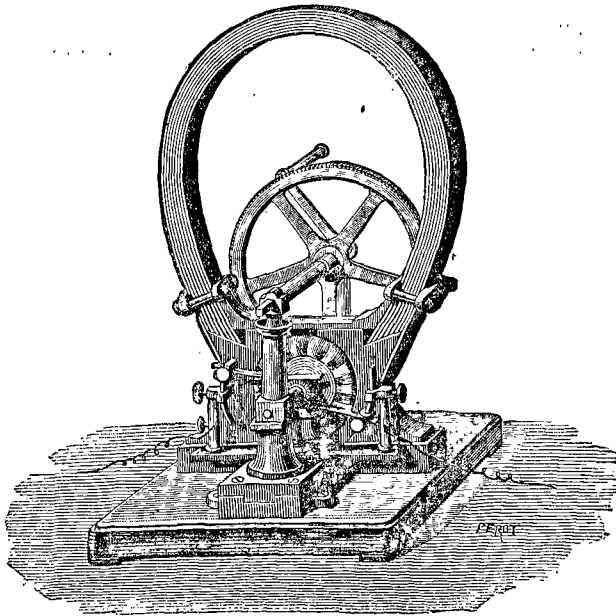


FIG. 294. — Machine Gramme à aimant Jamin.

aimant Jamin. On obtient une rotation très rapide à l'aide d'une transmission de mouvement par deux roues dentées de diamètres très différents.

R avant d'abandonner la précédente. La force électro-motrice est sensiblement proportionnelle à la vitesse.

Suivant que l'on veut obtenir des effets de quantité ou de tension, on garnit l'armature de fil gros et court, ou de fil fin et long.

Machine de Méritens (courants alternatifs).

L'armature se compose d'une ou plusieurs roues dont le contour est formé de seize segments de fer doux, isolés magnétiquement les uns des autres par des pièces de cuivre; ces segments, composés de lames minces de fer découpées à l'emporte-pièce et superposées servent de noyaux à autant de bobines enroulées dans le même sens et sont munis de chaque côté de plaques polaires composées de la même manière : le bout extérieur d'une bobine est joint au bout extérieur de la suivante, et le bout intérieur au bout intérieur de la précédente. Cette armature tourne à l'intérieur d'une ceinture formée par les seize pôles

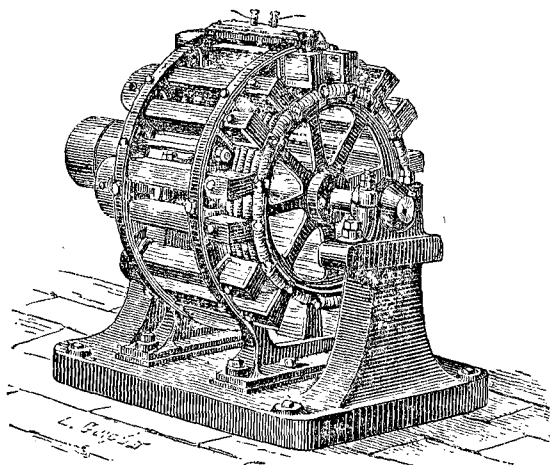


FIG. 295. — Machine de Méritens.

alternatifs de huit aimants permanents en fer à cheval, dont les branches sont parallèles à l'axe de l'armature (figure 295). Quand une bobine s'approche d'un pôle nord, la suivante s'approche d'un pôle sud. Les courants

produits dans deux *bobines* consécutives sont donc opposés; mais, par la façon dont leurs bouts sont reliés, les courants ont la même direction dans le *circuit*. Toutefois, comme le courant est renversé chaque fois qu'une bobine s'éloigne d'un pôle après s'en être rapprochée, la machine donne

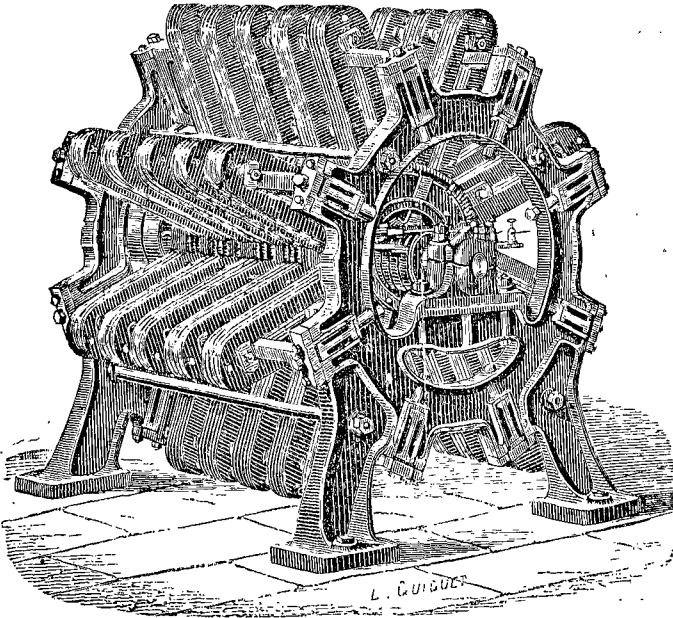


FIG. 296. — Machine de Méritens (grand modèle).

des courants alternatifs. Les extrémités du circuit des bobines sont soudées à deux viroles de cuivre, fixées sur l'axe et isolées de lui. Le courant est recueilli par des frotteurs en forme de balais en fil de cuivre fort et élastique. Si les sections qui composent l'armature circulaire de cette machine n'étaient pas isolées magnétiquement l'une de l'autre, cette machine ne différerait guère de celle de Gramme que

par le nombre des aimants et le mode d'accouplement des bobines.

La figure 296 représente le grand modèle de la même machine, pouvant alimenter jusqu'à vingt foyers lumineux. 40 aimants sont disposés normalement à l'axe et suivant des couronnes parallèles, comme dans la machine de l'Alliance. Un plateau permutateur permet de prendre à volonté les courants en quantité ou en tension, et d'utiliser soit la puissance totale, soit une fraction de la machine (1).

MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

Le magnétisme permanent des aimants d'acier est inférieur au magnétisme temporaire que peut prendre le fer doux; d'autre part, il s'affaiblit avec le temps et il faut renouveler ou réaimanter les aimants. On a donc songé à remplacer les aimants permanents par des électro-aimants; mais s'il fallait aimanter ces électro-aimants par le courant d'une pile spéciale, le courant obtenu par induction coûterait plus cher qu'un courant égal produit directement par la pile.

Machine de Wilde.

M. Wilde (1867) a eu l'idée d'employer le courant induit par des aimants permanents à *exciter* un grand électro-

(1) Ces machines ont été adoptées pour le service des phares anglais : dans les essais qui ont été faits, une machine de cinq anneaux mue par une force de cinq chevaux, a donné une lumière de 900 becs Carcel. A la vitesse de 850 tours par minute, l'échauffement n'était que de 5° C. au bout de dix heures de marche. Les nouvelles machines peuvent donner une lumière de 1540 becs carcel. Les lames de fer doux des anneaux sont au nombre de 70, afin que les aimantations et désaimantations soient très rapides.

Le phare de Planier, près Marseille, va être muni de machines de ce genre, à deux circuits donnant chacun une lumière de 625 becs Carcel à 425 tours : en réunissant les deux circuits, on pourra doubler la lumière en temps de brume.

aimant, et à lui faire produire un second courant, dont l'intensité, par rapport à celle du premier, sera d'autant plus grande que l'électro-aimant est plus puissant par rapport à l'aimant permanent. Ce second courant peut servir à exciter un second électro-aimant plus fort encore que le précédent, et ce second électro-aimant induira un troisième courant plus intense que chacun des deux autres.

La machine de Wilde, dont la figure 297 montre l'élevation debout, se compose de deux machines Siemens (page 359) superposées et de grandeurs inégales; dans la plus grande, l'aimant permanent est remplacé par un fort électro-aimant. La petite machine supérieure M ou machine *excitatrice*, produit des courants alternatifs qui sont redressés par un commutateur et envoyés dans le grand électro-aimant EE, dont les deux branches, très allongées, sont formées de grosses plaques de tôle, et dont la plaque de fer P, qui supporte l'excitatrice, forme la culasse. Les

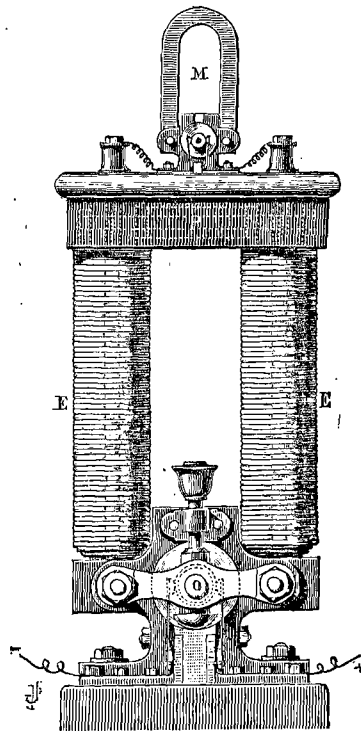


FIG. 297.

pôles de cet électro-aimant sont armés de pièces de fer rSr , $r'Nr'$ (fig. 290) séparées par une plaque de cuivre bb et

forment une cavité cylindrique O dans laquelle tourne la seconde bobine Siemens (fig. 297), identique à la première, mais d'un diamètre triple. A ses pôles (+) (—) aboutissent les extrémités du circuit extérieur. La machine inférieure est le *générateur*. A l'aide de deux courroies de transmission et d'un moteur à vapeur, on fait tourner la petite bobine à la vitesse de 2400 tours à la minute, et la grande à celle de 1500 tours.

Principe des machines dynamo.

L'idée de M. Wilde a été développée par MM. Siemens et Wheatstone, qui ont proposé en même temps d'utiliser les courants induits par un aimant pour convertir cet aimant en électro-aimant (1). Si faible que soit la quantité de magnétisme permanent que possède à l'origine l'aimant inducteur devenu le noyau de l'électro-aimant, il fait naître, dès les premiers tours de la bobine, un courant induit qui, passant dans l'électro-aimant, augmente sa puissance, d'où résulte un courant induit plus intense, qui augmente encore la puissance de l'électro-aimant, en sorte que l'intensité du champ magnétique et celle du courant vont en augmentant; l'une, jusqu'à ce que le fer doux ait

(1) M. C. Varley a émis ce principe dans un brevet pris en 1866. En janvier 1867, le docteur Werner Siemens le communiquait à l'Académie des sciences de Berlin. Enfin, le 14 février 1867, deux mémoires étaient lus à la Société royale de Londres : l'un, « sur la conversion de la force électrique en force dynamique, sans l'aide du magnétisme permanent », par le docteur C. William Siemens, dans lequel l'auteur expose que la coopération de la pile n'est nécessaire qu'un instant avant le commencement de la rotation, afin d'introduire l'action magnétique, qui s'accumulera ensuite sans elle; l'autre, « sur l'accroissement de la puissance d'un aimant par la réaction qu'exercent sur cet aimant les courants qu'il induit lui-même », par C. Wheatstone, dans lequel l'auteur constate qu'un électro-aimant qui possède au début la plus légère trace de polarité devient un aimant puissant par l'accroissement graduel des courants qu'il engendre lui-même.

atteint le maximum d'aimantation, l'autre jusqu'à ce que la résistance qu'éprouve la bobine induite, quand elle passe devant les pôles de l'inducteur, fasse équilibre à la puissance motrice. Il suffit, pour produire cet effet, d'une trace de magnétisme résiduel ou rémanent, comme celle que laisse sur le fer le plus doux le magnétisme résiduel d'une pile ou l'action de la terre; et, comme cette dernière agit toujours sur les masses de fer, quelle que soit leur orientation, il en résulte que l'excitation initiale se fait naturellement et que la transformation du travail mécanique en énergie électrique s'opère directement par la rotation de pièces métalliques devant d'autres pièces métalliques.

Dans les machines dynamo à courant continu, l'excitation des inducteurs est produite tantôt en les *intercalant* dans le circuit principal composé de l'induit et du circuit extérieur, tantôt en les mettant en *dérivation* sur le circuit principal, en sorte que le courant de l'induit se divise entre les électro-aimants qu'il excite et le circuit extérieur, où il est utilisé comme chaleur, lumière, action chimique ou travail mécanique; tantôt, enfin, par un générateur indépendant (1).

Dans les machines à courants alternatifs, le courant continu nécessaire pour l'excitation est fourni soit par une

(1) *Machines de Ladd.* — La dernière disposition a été appliquée par Ladd (1867) à deux machines : dans l'une, l'instrument est composé de deux grosses bobines plates, placées horizontalement l'une au-dessus de l'autre et reliées de façon à présenter en regard leurs pôles contraires; les larges plaques de fer qui en forment les noyaux sont terminées de chaque côté par des masses polaires dans lesquelles tournent deux bobines Siemens de grosseurs différentes; la plus petite excite l'électro-aimant, la plus grosse envoie son courant dans le circuit extérieur.

L'autre machine de Ladd a l'aspect de la machine de Wilde (fig. 297), dont on supprimerait l'excitatrice M; le générateur seul est conservé, mais l'armature tournante O est munie de deux circuits, l'un pour exciter l'électro-aimant EE, l'autre pour les usages externes.

machine indépendante, soit par une fraction du courant redressée dans ce but par un commutateur.

Machines dynamo à courant continu.

Le courant continu est indispensable pour la galvanoplastie; il est employé de préférence au courant alternatif dans un certain nombre de lampes électriques et sert à exciter les machines à courants alternatifs.

Machine Gramme. — La figure 298 représente la ma-

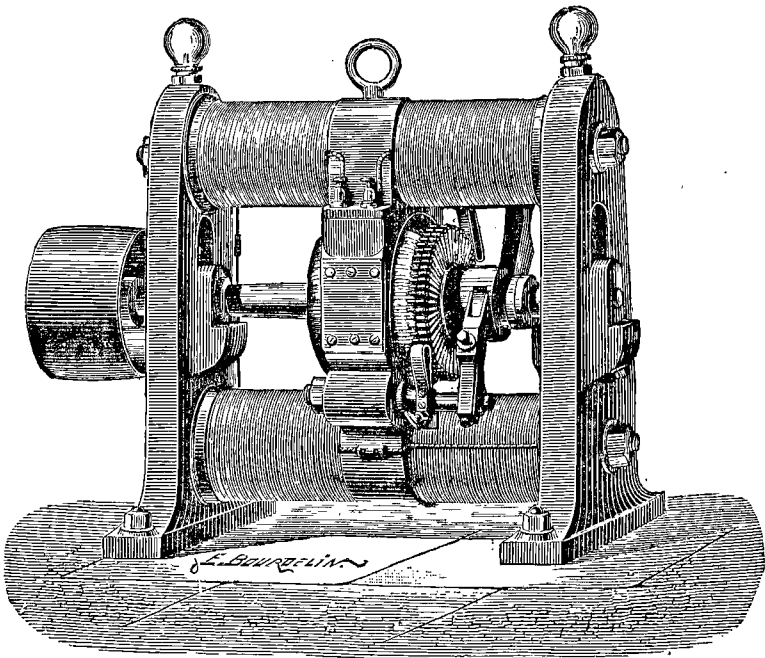


FIG. 298. — Machine Gramme, type d'atelier.

chine Gramme, dite *type d'atelier*. Les noyaux des inducteurs sont constitués par deux barres horizontales de fer,

fixées sur le bâti et portant en leur milieu, où se trouvent les pôles, deux armatures de fer qui entourent les $\frac{3}{4}$ de l'anneau : les inducteurs sont dans le circuit principal (1).

Machine Siemens (1873). — Dans cette machine, combinée par M. Von Hefner-Alteneck, ingénieur de la maison Siemens de Berlin, l'armature tournante consiste en un tambour mince en fer, terminé par deux calottes bombées, sur lequel le fil est enroulé, de manière à former une sorte de pelote allongée, dont toutes les parties sont influencées par les pôles magnétiques, sauf celles qui garnissent les deux calottes. Les inducteurs sont formés d'une série de lames de fer, garnies de fil à leurs extrémités, et dont les parties médianes, où se trouvent les pôles, sont cintrées de façon à embrasser étroitement la bobine tournante. On voit que les fils de l'induit coupent les lignes de force à angles droits dans la plus grande partie de leurs parcours, et il en résulte des courants qui changent de sens quand le fil traverse la ligne EE' (fig. 291). Le fil enroulé sur le tam-

(1) Le nombre des collecteurs étant de 60, et la vitesse de 900 tours à la minute, on obtient 54 000 courants par minute. Les deux modèles les plus courants pour l'éclairage des ateliers nécessitent l'un 1 cheval-vapeur, l'autre 2,5.

Dans la machine à galvanoplastie, où il importe que la résistance intérieure soit très faible, la garniture des inducteurs est formée d'une seule bande de cuivre mince tenant toute la largeur d'une moitié de chaque barre ; la bobine tournante est formée de fil méplat très épais. Avec une force motrice de 50 kilogrammètres, la vitesse est de 500 tours par minute, et la machine dépose 600 grammes d'argent à l'heure. Une disposition spéciale est prise pour éviter qu'en cas d'arrêt, le courant de polarisation ne détermine dans les inducteurs une excitation inverse de celle qu'ils possèdent, d'où résulterait, à la reprise du travail, un courant inverse amenant la destruction du dépôt galvanique déjà obtenu. Elle consiste à relier les balais aux inducteurs par une lame mobile à contre-poids, dite *brise-courant* ; dès que l'aimantation des inducteurs n'est plus suffisante pour retenir cette lame, le contre-poids la fait tomber et, le circuit étant ainsi coupé automatiquement, le courant de polarisation ne peut agir sur les inducteurs. Pour repartir, il suffit de refermer le circuit en remplaçant le brise-courant.

bour est divisé en écheveaux correspondant aux sections de l'anneau Gramme, et le courant continu est obtenu en employant le mode d'attache des fils, les collecteurs et les balais du système Gramme. Il en résulte que cette machine peut être considérée comme une machine Gramme à armature cylindrique, avec cette différence que le fil ne recouvre

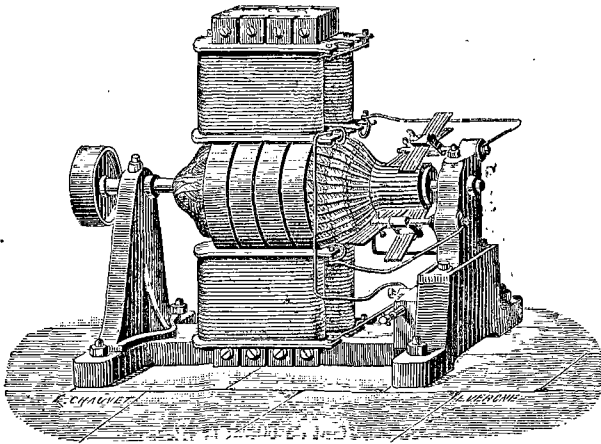


Fig. 209. — Excitatrice de Siemens.

que la partie *extérieure* du tambour qui le supporte, et que le noyau annulaire de Gramme est remplacé par une carcasse en fer très légère. Les balais sont doubles pour chaque pôle, afin que les collecteurs soient toujours en contact avec l'un des balais, quand l'autre rencontre une partie isolée, ce qui rend le courant plus régulier (1). La

(1) Les inducteurs peuvent être placés à volonté soit dans le circuit principal, soit en dérivation. Dans le premier cas, un des balais est relié à un des bouts du fil inducteur, dont l'autre bout est relié à un des bouts du circuit extérieur; l'autre bout de ce dernier aboutit au second balai. Dans le second cas, chaque balai est relié à la fois à un bout du fil inducteur et à un bout du circuit extérieur. Des expériences communiquées à la Société

figure 299 représente la forme donnée à cette machine, quand elle est employée comme *excitatrice*; dans la machine pour la galvanoplastie ou l'éclairage électrique à courant continu, les inducteurs sont horizontaux, au lieu d'être verticaux. Il suffit de faire tourner de 90 degrés la bobine et les inducteurs autour de l'axe dans la figure, pour avoir l'aspect de cette autre forme.

Machine Brush (1876). — La machine de M. Brush, de Philadelphie, se compose d'un anneau aplati, sur lequel se trouvent huit parties évidées servant de noyaux aux bobines induites. Cet anneau (fig. 300) tourne dans un champ

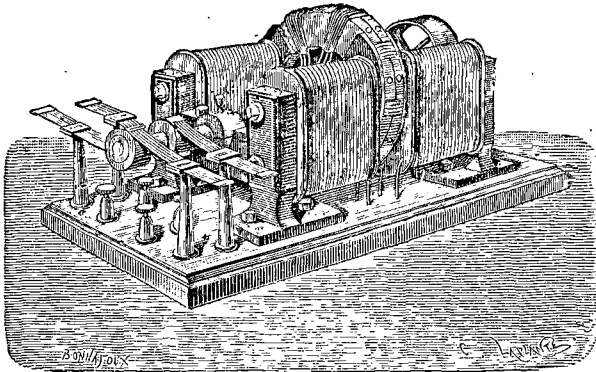


FIG. 300. — Machine Brush.

magnétique constitué par deux électro-aimants en fer à cheval, placés des deux côtés de l'anneau, et dont les pôles semblables se regardent : l'induction se fait donc par les faces plates de l'anneau et non par le contour extérieur, comme dans la machine Gramme. Les bobines sont directement reliées à celles qui leur sont diamétralement oppo-

Royale, le 4 mars 1880, par M. Siemens, tendent à démontrer que le second système est plus favorable que le premier à la production des courants.

sées, en sorte que la machine comprend quatre circuits induits et quatre commutateurs. La figure 301 montre la

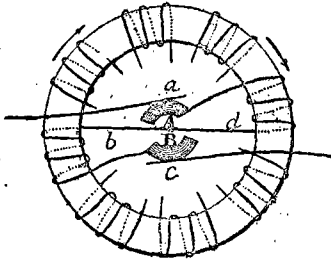


FIG. 301.

disposition des bobines et un des commutateurs: la bobine *b* est reliée à la bobine *d* et à l'arc B du commutateur, l'autre bout de la bobine *d* est reliée à l'arc A. Ces arcs sont isolés l'un de l'autre et du corps de l'arbre. Les lames

de cuivre *a* et *b* envoient le courant redressé dans les électro-aimants et le circuit extérieur. Cette machine, comme la suivante, est en usage aux États-Unis.

Machine Farmer-Wallace. — Un disque portant deux séries de bobines méplates tourne devant les pôles de deux

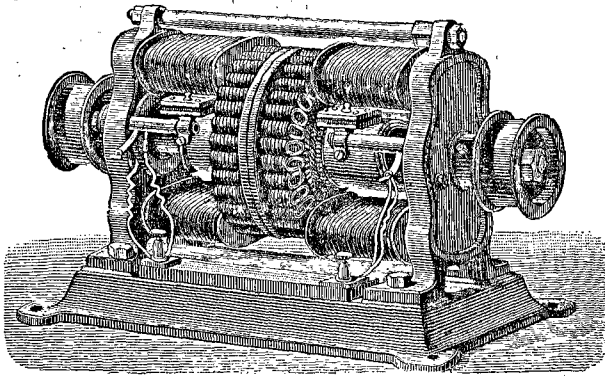


FIG. 302. — Machine Farmer-Wallace.

électro-aimants en fer à cheval disposés de part et d'autre du disque. Chaque bobine est reliée à la suivante et à un collecteur Gramme. La machine est double et chaque moitié

peut agir indépendamment, ou bien on peut réunir les deux moitiés soit en quantité, soit en série. Les inducteurs sont dans le circuit principal (1).

Autres machines à courant continu. — Nous mentionnerons encore les machines de Lontin en France (2), et celles de Weston et de Maxim en Amérique (3).

Machines dynamo à courants alternatifs.

Pour l'éclairage électrique, il est souvent inutile de redresser les courants; et, en particulier, pour les bougies électriques, les courants alternatifs sont nécessaires. Mais dans les machines dynamo, il est indispensable que les inducteurs soient aimantés par un courant continu. Ce dernier est fourni tantôt par une *excitatrice* séparée, et alors la machine à courants alternatifs prend le nom de machine à lumière, ou machine *distributrice*, ou machine à *division*, parce que, en général, elle alimente plusieurs circuits; tantôt il est fourni par une excitatrice montée sur le même axe que la machine principale, ou par une partie du courant induit que l'on redresse à cet effet, et la machine est dite alors *auto-excitatrice*.

(1) En substituant aux électro-aimants fixes des aimants permanents en fer à cheval, cette machine ne diffère pas d'une machine électro-magnétique imaginée dès 1872 par M. Niaudet.

(2) *Machine Lontin.* — L'induit est une roue dentée en fer dont chacune des dents constitue le noyau d'une bobine, d'où le nom de pignon magnétique. Cette roue tourne entre les pôles d'un électro-aimant inducteur fixe à deux branches, traversé par le courant de l'induit.

(3) La machine de *Weston*, employée surtout pour la galvanoplastie, est un pignon d'engrenage en fer doux, dont les dents sont entourées de bobines, et tournant entre deux inducteurs, composés comme ceux de la machine Siemens de lames de fer recourbées de manière à ce que l'induit soit enveloppé par les parties où se trouvent les pôles magnétiques. Un courant d'air, arrivant par l'axe de l'induit, passe par des trous percés entre les dents et se répand dans les diverses parties de la machine pour empêcher l'échauffement. La machine *Maxim* offre la plus grande analogie avec celle de Siemens.

Machine Lontin. — C'est M. Lontin qui a construit la première machine dynamo à courants alternatifs avec excitatrice spéciale (1).

Machine Gramme. — L'inducteur, qui est mobile, est constitué par un *pignon magnétique*, composé de huit électro-aimants droits à pôles alternés, excités par une machine type d'atelier (fig. 298), dont le courant arrive sur le pignon par deux balais frottant sur deux viroles distinctes. Les pôles tournent à l'intérieur de l'induit, qui est fixe et est constitué par un cylindre de fer, divisé en huit sections recouvertes de fil, chaque section étant ainsi le siège de courants alternatifs. Les sections comprenant chacune 4 bobines, on a en somme 32 bobines induites, ce qui permet d'obtenir à volonté 32 courants distincts, ou de coupler les fils pour n'avoir que 16,8 ou seulement 4 courants (2) pour desservir 4 circuits chacun de 5 bougies, comme dans les appareils pour l'éclairage de la place de l'Opéra à Paris ou des quais de la Tamise à Londres. L'in-

(1) *Machine Lontin.* — L'excitatrice est la machine Lontin à courant continu (page 375). Dans la machine à division, l'induit est fixe et l'inducteur mobile. L'induit se compose d'une série d'électro-aimants droits fixés à l'intérieur d'une couronne de fer disposée verticalement; au centre de cette couronne tourne le système inducteur consistant en un pignon dont les dents, en nombre égal à celui des bobines induites, forment les noyaux d'un nombre égal d'électro-aimants. Le courant de l'excitatrice arrive dans ce pignon par deux frotteurs, et traverse ces électro-aimants, qu'il aimante en alternant les pôles à la circonférence extérieure. Les bobines induites sont reliées par couples : leurs extrémités libres aboutissent à un commutateur qui permet de recueillir leurs courants séparément ou collectivement.

(2) *a, b, c, d* étant les bobines qui composent chaque section, il est clair que les bobines *a* occupent toutes la même position par rapport aux pôles mobiles, et sont parcourues au même instant par des courants de même intensité qui auront un certain sens dans les bobines *a* des sections 1, 3, 5, 7, et le sens contraire dans les bobines *a* des sections 2, 4, 6, 8, en regard d'un pôle inverse. On forme des bobines *a* un premier groupe desservant un premier circuit; les bobines *b, c, d* forment de même trois autres groupes desservant trois autres circuits.

duit étant fixe, la prise des courants se fait facilement sur les bornes extérieures servant à relier les diverses bobines couplées ensemble.

En 1879, M. Gramme a rendu sa machine *auto-excita-*

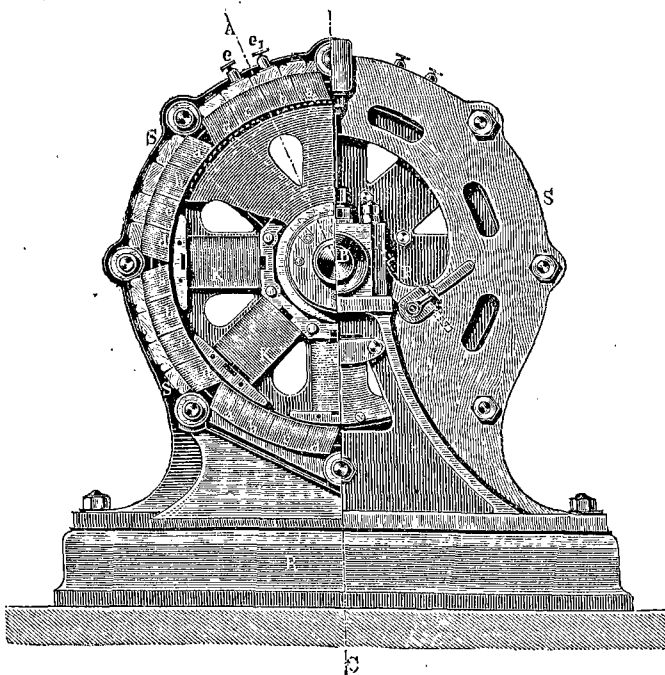


FIG. 303 — Machine Gramme à courants alternatifs

trice en montant sur le même bâti une machine dynamo à courant continu, servant d'excitatrice, et une machine à courants alternatifs, le même axe mettant les deux machines en mouvement. On a ainsi un appareil complet, plus économique, moins encombrant et plus facile à installer.

Machine Siemens. — A l'inverse des machines Lontin

et Gramme, l'inducteur est fixe et l'induit mobile. Les électro-aimants, aimantés par le courant continu de la petite excitatrice (fig. 299), sont disposés sur deux bâtis circulaires en fonte, maintenus verticaux et parallèles sur un socle en fonte. Entre ces deux séries d'électro-aimants,

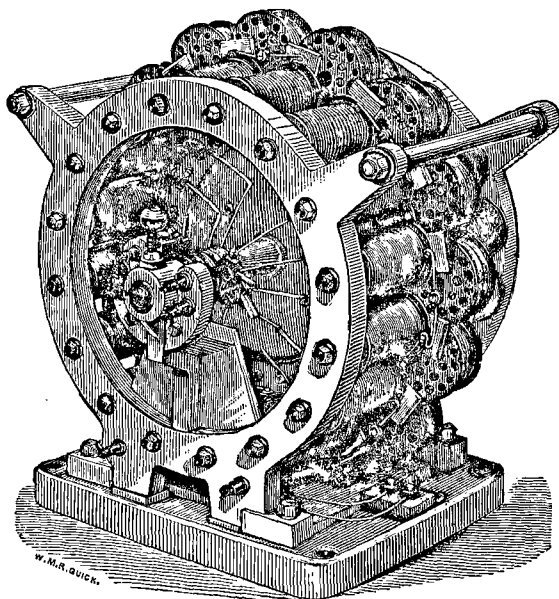


FIG. 304. — Machine Siemens à courants alternatifs.

dont les pôles consécutifs sont alternés, tourne un plateau portant les bobines induites en nombre égal à celui des électro-aimants en regard. Ces bobines (au nombre de 16 sur la figure 304) sont formées de deux joues métalliques maintenues par des entretoises en bois, autour desquelles est enroulé le fil, et ne renferment pas de noyau de fer, pour éviter la chaleur produite par l'aimantation et la désaimantation du fer doux et donner plus de légèreté au

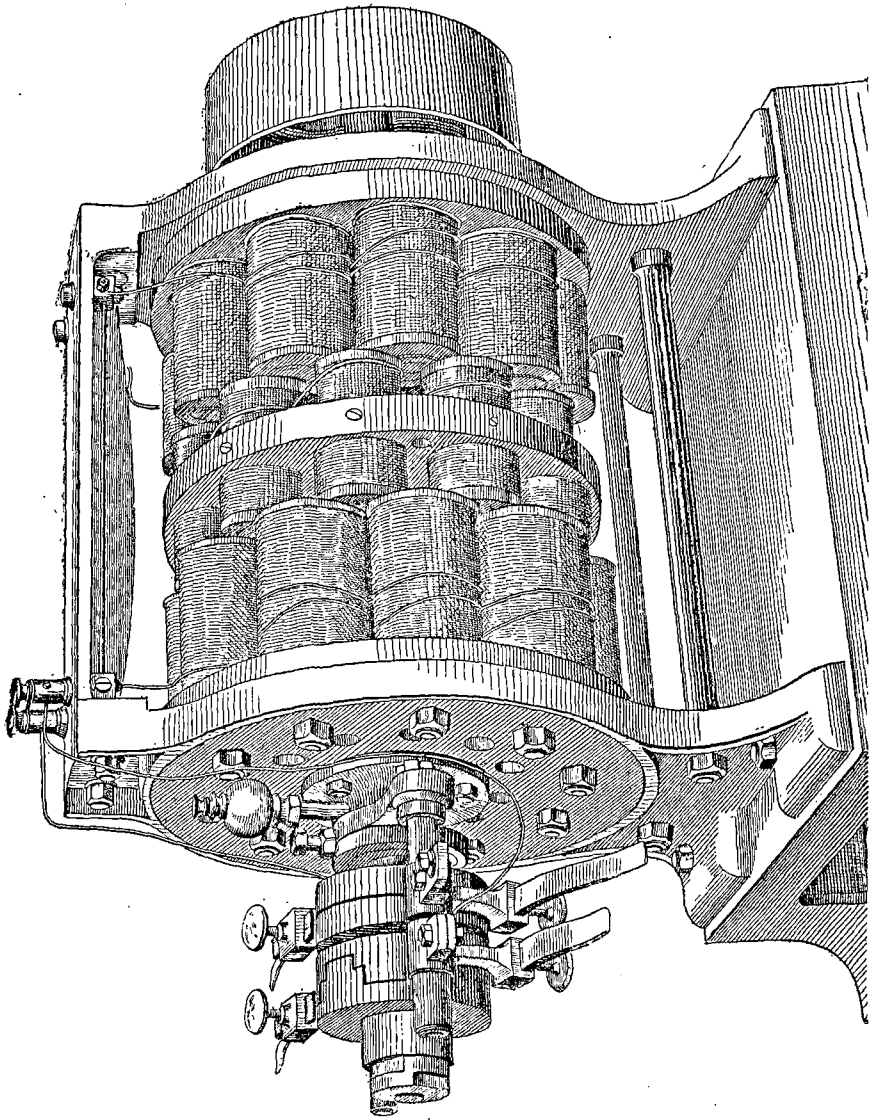
système tournant. Elles sont groupées de façon à desservir 1, 2 ou 4 circuits, sur chacun desquels on peut placer jusqu'à dix lampes différentielles. Les courants sont recueillis par des balais. Les noyaux des électro-aimants sont munis d'appendices polaires.

Machine auto-excitatrice de Wilde (Pl. LI). — L'inducteur fixe se compose de deux bâtis verticaux portant chacun une couronne d'électro-aimants. Entre les deux couronnes tourne l'induit, constitué par un plateau de fer mobile, garni sur chaque face de bobines (avec noyau de fer) en nombre égal à celui des électro-aimants en regard. L'arbre de ce plateau traverse les deux bâtis et porte à ses extrémités d'une part la poulie motrice, de l'autre un commutateur et des collecteurs. L'induit est divisé en deux parties : une première série de 4 bobines aboutit au commutateur, formé de deux disques en fonte munis de saillies et de creux en nombre égal à celui des bobines ; leurs courants, recueillis alternativement sur chaque disque par deux frotteurs, sont envoyés *redressés* dans l'inducteur. L'autre série de bobines aboutit aux collecteurs, qui sont des disques en fonte sur lesquels appuient les balais reliés au circuit extérieur.

MACHINES ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

Le courant électrique peut produire à son tour du travail mécanique : de là les machines *électro-magnétiques* ou *moteurs électriques*. Le prix élevé du zinc consommé dans la pile, eu égard à celui du charbon consommé dans une machine à vapeur (1), empêche leur emploi sur une

(1) A poids égal, l'énergie calorifique du zinc consommé dans la pile est le dixième de celle développée par la combustion du charbon. Il est vrai que, dans la transformation de l'énergie en effet mécanique, l'avantage est à



Pl. LI. — Machine auto-excitatrice de Wilde.

grande échelle; mais de petits moteurs électriques sont très commodes dans certaines circonstances, notamment dans les travaux de laboratoire, pour faire mouvoir des commutateurs rapides, des chronographes, des miroirs tournants, etc., parce qu'ils peuvent fonctionner à grande vitesse, partir et s'arrêter instantanément, et de plus qu'ils n'exigent pas de surveillance pendant leur marche.

L'interrupteur rapide représenté dans la planche XXXIII (vol. II, p. 106) est mû par un moteur électrique, construit par M. Apps.

Moteur électrique de Apps. — Ce moteur a une disposition spécialement favorable aux travaux où l'on a besoin d'une grande vitesse. Deux électro-aimants en fer à cheval sont placés de façon que leurs pôles soient en face l'un de l'autre. L'un des électro-aimants est fixe, l'autre tourne autour d'un axe parallèle à ses noyaux et situé à égale distance de ceux-ci. Le courant a une direction constante dans l'aimant fixe; dans l'aimant mobile, il change de sens à chaque demi-révolution. Le commutateur est disposé de telle sorte que la force est toujours attractive entre pôles qui se rapprochent, et toujours répulsive entre pôles qui s'éloignent l'un de l'autre. Deux vis règlent la pression des ressorts du commutateur. Avec un peu de soin dans le réglage, on peut amener cette machine à une vitesse de 100 tours par seconde. Le volant de la machine a seulement 5,08 centimètres de diamètre.

l'électricité; car les meilleures machines n'utilisent que $\frac{1}{4}$ de la chaleur communiquée à la chaudière (et une fraction plus petite de celle du foyer) et souvent on ne dépasse pas le $\frac{1}{10}$. Mais le prix du zinc étant au moins 20 fois celui du charbon, le zinc dépensé coûtera 200 fois plus cher que le charbon pour la production de quantités égales d'énergie potentielle. En admettant que l'engin électro-magnétique soit 4 fois plus efficace que l'engin calorifique pour transformer l'énergie potentielle en énergie actuelle, la pile coûtera encore 50 fois plus cher que la machine à vapeur. (Jenkin.)

Reversibilité des machines à courant continu. — Si l'on relie les pôles d'une pile aux balais d'une machine Gramme, par exemple, l'anneau se met à tourner et la machine est transformée en moteur électrique.

Moteur Deprez (fig. 305). — M. Deprez a construit une machine magnéto-électrique consistant en une bobine Siemens, tournant entre les branches d'un aimant permanent en fer à cheval, et disposée parallèlement à ces branches, afin

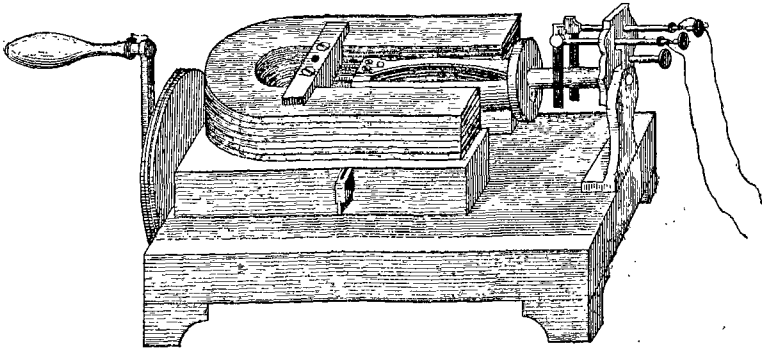


FIG 305.

d'utiliser la plus grande partie du magnétisme de l'aimant et pas seulement celui des parties polaires, comme dans le dispositif Siemens. Deux balais en fil de laiton recueillent les courants redressés par un commutateur à renversement de pôles. En amenant le courant d'une pile à ces balais, on a un petit moteur électrique qui peut servir aux mêmes usages que le moteur de Apps, actionner une machine à coudre, remonter les poids de certains appareils télégraphiques, etc. Son action, avec le *réglateur* dont il est muni, est si constante qu'on peut l'employer, comme le moteur bien connu de *Froment*, à

faire mouvoir des machines à diviser et des cylindres enregistreurs (1).

TRANSMISSION ÉLECTRIQUE DE LA FORCE

La force mécanique peut être transmise commodément et économiquement, d'une roue hydraulique, par exemple, à un atelier situé à une certaine distance, au moyen de deux machines dynamo à courant continu. L'une d'elles est mue par la chute de l'eau, les courants qu'elle engendre sont transmis à travers des fils conducteurs qui peuvent suivre toutes les sinuosités d'un chemin quelconque, et avoir jusqu'à 1600 mètres de long : ces courants font tourner la seconde machine située dans l'atelier, laquelle produit le travail mécanique que l'on veut obtenir. On peut ainsi transporter au loin des forces inutilisables sur place (2).

(1) Ce régulateur consiste en un petit ressort fixé à une extrémité du fil de la bobine, qui s'épaissit ensuite de manière à présenter une certaine masse à la force centrifuge, et se termine par une vis de réglage présentant sa pointe à une petite pièce de platine soudée sur le commutateur. Dès que la vitesse devient trop grande, la pointe s'écarte du commutateur par l'effet de la force centrifuge, le circuit est rompu et il reste ouvert jusqu'à ce que la vitesse redevienne normale : d'où le nom de *moteur à vitesse constante*. Les balais sont portés par un système mobile qui permet de les incliner plus ou moins, de manière à écarter à volonté leurs points de contact de la fente horizontale du commutateur : on peut ainsi graduer la vitesse engendrée par un courant électrique donné, et même changer le sens de la rotation, sans toucher aux fils de pile, en inclinant assez le système mobile pour alterner les contacts des balais avec les coquilles du commutateur.

Quand l'appareil est employé comme machine magnéto-électrique, on serre la vis du régulateur de manière à le rendre fixe, et on obtient à volonté des courants redressés ou alternatifs, en déplaçant les balais de manière à utiliser la partie médiane du commutateur ou ses extrémités. Le moteur petit modèle a un aimant du poids de 1 kil., 7 ; sa bobine pèse 0 kil., 4. Avec 5 éléments Bunsen, grand modèle, il développe 1,1 kilogrammètre par seconde. Comme appareil magnéto-électrique; mis à la main, il développe une force électro-motrice de 5 volts et remplace 2 éléments Bunsen.

(2) Voir *The Electric transmission of mechanical Power*, conférence faite

APPLICATIONS

Labourage électrique. — Des expériences publiques faites en 1879 ont démontré qu'on pouvait utiliser les machines Gramme pour rem placer les locomotives routières dans le labourage mécanique.

Chemin de fer électrique. — En 1879, M. Werner Siemens a fait des expériences à Berlin sur la traction électrique des chemins de fer aériens et souterrains dans les grandes villes. Dans le système le plus récent, le wagon, contenant quinze places, porte lui-même sa machine motrice : les rails, isolés sur des traverses de bois, conduisent le courant, engendré par un générateur fixe, aux roues de droite et de gauche, lesquelles sont reliées aux électrodes du moteur. Un commutateur, placé à l'avant du wagon, permet de mettre en marche et d'arrêter à volonté (1).

Poste aux lettres électrique. — M. Werner Siemens a également projeté d'effectuer le transport des lettres à l'aide d'une petite machine dynamo roulant sur des rails dans un boyau carré en tôle de fer de 0^m,50 de côté, servant aussi de conducteur au courant. La terre formant fil de retour, la résistance électrique ne dépasserait pas 0,02 Ohm par kilomètre, et une même machine fixe alimenterait 20 kilomètres de ligne. La voiture boîte à lettres poussée par le moteur étant très légère, celui-ci pourrait faire 1000 tours par minute, et on aurait une vitesse de 60 kilomètres à l'heure. On produirait les arrêts en rompant le circuit (2).

Synchronisme électrique de deux mouvements de rotation. — M. Deprez a résolu ce problème, pour des vitesses comprises entre 0 et 40 tours par seconde, à l'aide d'un appareil composé d'un transmetteur et d'un récepteur. Le transmetteur est formé de deux commutateurs A et B, tournant sur le même axe et croisés à angle droit, qui renversent chacun le courant deux fois par tour ; les positions de l'axe, correspondant à ces inversions, se suivent ainsi à des intervalles de un quart de tour, et les deux fils qui partent du transmetteur sont sillonnés par des courants *a* et *b*, dont les alternances forment à cha-

aux ouvriers de Sheffield, lors de la réunion de l'Association britannique dans cette ville, en 1879, par le professeur W. E. Ayrton. *Electrician* du 30 août 1879.

(1) Voir la Conférence de M. W. Siemens, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1880, p. 53.

(2) *Id.*, p. 54.

que tour les quatre combinaisons $+a + b$, $+a - b$, $-a - b$, $-a + b$. Le récepteur se compose de deux bobines Siemens A'B', également fixées à angle droit sur un même axe se confondant avec l'axe d'un aimant permanent entre les branches duquel tournent les bobines. Quand elles sont traversées par des courants de même intensité, mais de signe quelconque, elles se placent dans une position telle que l'angle droit de leurs noyaux est bissecté par la ligne des pôles, et à chaque combinaison de courants correspond une seule position d'équilibre. Il résulte de là que l'axe du récepteur suit tous les mouvements de l'axe du transmetteur, à un quart de tour près et dans les deux sens. Un mouvement quelconque pouvant être regardé comme la résultante de deux mouvements de rotation, cet appareil permet, grâce à l'adjonction d'un mécanisme simple, de transmettre à distance un mouvement de grandeur et de direction quelconque, et par suite le dessin ou l'écriture.

Les planches L et LI et les figures 295, 296, 298, 300, 302 ont été mises à notre disposition par le journal *la Lumière électrique*; les figures 292, 293, 294, ainsi que celles de l'appendice suivant, sont empruntées à la *Théorie de la machine de Gramme*, de M. A. Bréguet; les figures 299, 304 ont été prêtées par M. Boistel, de la maison Siemens frères; les figures 301, 303 sont empruntées à *l'Éclairage par l'électricité*, de M. Fontaine.

APPENDICE AU CHAPITRE XL.

INDUCTION DANS LES PLAQUES CONDUCTRICES (1)

Nous avons étudié les courants que les aimants induisent dans des bobines de fil ; il reste encore à examiner les courants qu'ils induisent dans les plaques conductrices. En 1824, Gambey remarqua que les oscillations d'une aiguille aimantée s'éteignaient beaucoup plus vite quand elle était suspendue dans le voisinage d'un disque de cuivre épais. Arago en conclut qu'entre la plaque en repos et l'aiguille en mouvement devait s'exercer une force opposée à leur mouvement relatif et que réciproquement une aiguille au repos devait être influencée par une plaque en mouvement. En faisant tourner rapidement un disque de cuivre au-dessous d'une aiguille aimantée reposant par un petit pivot sur une membrane placée au-dessus du disque, le centre de l'aiguille se trouvant sur le centre du disque, il vérifia que l'aiguille dévie dans le sens du mouvement du disque et qu'elle tourne dans ce même sens quand la vitesse est suffisante.

Babbage et Herschell, renversant cette expérience, placèrent en équilibre sur un pivot un disque de cuivre au-dessus d'un aimant vertical en fer à cheval qu'ils faisaient tourner au-dessous de la membrane : le disque suivit encore le mouvement.

Enfin Faraday, renversant l'expérience de Gambey, vérifia que le voisinage d'un aimant immobile arrête le mouvement d'un métal tournant. Entre les pôles d'un électro-aimant (fig. 191, p. 53), il plaça un cube de cuivre suspendu par un fil de torsion ; en tordant le fil et le laissant détordre, le cube tournait rapidement, mais il s'arrêtait aussitôt que l'on aimantait le fer doux par le passage du courant.

Ces phénomènes reçurent le nom de *magnétisme de rotation* : Faraday les expliqua en 1831 par la réaction des courants que l'aimant induit dans le disque, quand il y a mouvement relatif. Conformément à la loi de Lenz, le mouvement imprimé fait naître dans le disque des courants tendant à s'opposer à ce mouvement ou à pro-

(1) Voy. aussi chap. XXIV.

dûre par réaction sur l'inducteur un mouvement contraire. Et, en effet, si on gêne ou empêche la formation des courants induits, le phénomène diminue ou cesse : l'entraînement de l'aiguille aimantée décroît en même temps que la conductibilité du disque tournant, et n'a plus lieu quand le disque est en verre, ou quand on scie le disque de cuivre de manière à le diviser en secteurs n'adhérant entre eux que par le sommet. Enfin, l'induction est nulle sur un cylindre métallique fendu que l'on introduit dans une bobine.

- Mais l'existence de ces courants d'induction dans un disque en mouvement a été démontrée directement par Faraday, qui a réussi à les recueillir en renversant l'expérience de la roue de Barlow.

Roue de Barlow (1828). — Une roue en cuivre, mobile autour d'un axe horizontal, est placée entre les branches d'un aimant en fer à cheval NS, fig. 306 : le courant arrive à l'axe de rotation, descend par le rayon vertical aboutissant à une rainure pleine de mercure et revient à la pile. Les deux pôles de l'aimant, agissant sur le courant

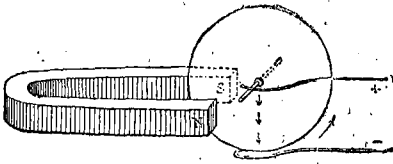


FIG. 306.

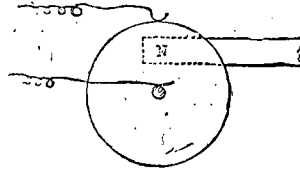


FIG. 307.

vertical, déterminent une rotation du disque dans le sens de la flèche. Le sens de la rotation change avec le sens du courant.

Disque de Faraday (1831). — L'expérience de Barlow est réversible. Plaçons le disque entre les pôles d'un aimant (fig. 307) ou mieux d'un électro-aimant, et faisons-le tourner. En mettant l'axe en communication avec un des bouts d'un galvanomètre dont l'autre bout se termine par un ressort frottant sur le bord du disque, on constata l'existence d'un courant continu dont le sens change avec celui du mouvement. Faraday réalisa ainsi la première machine magnéto-électrique.

Recherches de Matteucci. — Matteucci a étudié la marche des courants induits dans un disque horizontal en cuivre, tournant au-dessus d'un électro-aimant vertical à deux branches, dont les pôles étaient à égale distance du centre de la plaque. En promenant à la surface du disque les deux extrémités du fil d'un galvanomètre, il détermina la forme des courbes équipotentielles, et en menant les

trajectoires orthogonales de ces courbes, il obtint les lignes de flux. Il vérifia que l'une de ces lignes était la ligne des pôles, c'est-à-dire le diamètre passant par la projection des pôles sur la plaque.

Retard des courants induits. — La non-instantanéité des phénomènes d'induction a été reconnue par Faraday. Matteucci constata que la ligne des pôles est un axe de symétrie pour les courants induits tant que la vitesse est modérée; mais, à mesure qu'elle augmente, cet axe s'écarte dans le sens du mouvement, et fait avec la ligne des pôles un angle qui augmente avec la vitesse. C'est ce déplacement de l'axe de symétrie qui explique d'ailleurs qu'une aiguille aimantée suit les mouvements du disque dans l'expérience d'Arago. Enfin, Verdet expliqua par le retard dans l'aimantation et la désaimantation du fer doux la nécessité où l'on est de déplacer, dans la machine de Clarke, les points où la direction du courant change de signe.

Disque de Foucault. — Un train d'engrenages permet d'imprimer une rotation très rapide à un disque de cuivre tournant entre les pôles d'un électro-aimant : le disque, ayant une vitesse acquise, s'arrête brusquement dès qu'on fait passer le courant dans les bobines, par l'effet de la réaction des courants d'induction. Si on veut continuer le mouvement en agissant sur la manivelle, on constate qu'il faut dépenser un travail considérable tant que l'aimantation persiste, pour vaincre la réaction de ces courants, et enfin le disque s'échauffe par le passage de ces courants, et la chaleur développée correspond au travail anéanti (1).

THÉORIE DE LA MACHINE DE GRAMME

La machine de Gramme est réversible. La rotation de sa bobine donne naissance à un courant électrique, et, réciproquement, si un courant traverse la bobine, cette dernière se mettra à tourner autour de son axe. En raison de cette réversibilité si complète, toute théorie acceptable de la machine, prise comme électromoteur, doit pouvoir

(1) L'expérience suivante est encore une application intéressante de conservation et de transformation d'énergie. Dans le circuit d'une machine Gramme, que l'on fait tourner à la main, on intercale un fil fin de platine et les rhéophores d'une seconde machine Gramme : celle-ci se met à tourner par l'effet du courant et le fil ne rougit pas; mais, si on l'empêche de tourner, le fil se met aussitôt à rougir. Au moment où le circuit est rompu par la fusion du fil, l'effort pour mettre en mouvement la première machine diminue brusquement.

se retourner de toutes pièces pour expliquer la machine comme source de courant.

M. Antoine Bréguet, pour arriver jusqu'à la machine de Gramme, a réalisé une série d'appareils de rotation rudimentaires (1) qui le conduisent également à la théorie de plusieurs autres machines, celle de Von Alteneck (dite machine Siemens) entre autres. Ce qui suit est une analyse du mémoire que M. A. Bréguet a consacré à ce sujet dans les *Annales de chimie et de physique* (janvier 1879).

Rotations électro-magnétiques.

Les lignes de force d'un champ magnétique, telles que les a définies Faraday, sont de l'usage le plus commode lorsqu'on veut concevoir sans difficulté les actions réciproques des aimants et des courants.

Les propriétés que Faraday leur a reconnues sont les suivantes :

- 1^o Ces lignes tendent à se raccourcir;
- 2^o Des lignes de force de même sens, placées côte à côte, se repoussent.

L'aspect d'un champ magnétique quelconque, tel qu'on peut l'obtenir sur une feuille de carton à l'aide de limaille de fer, peut très aisément se prévoir avec le secours de ces deux définitions. La première conduit à se figurer une ligne de force comme un fil élastique dont les points fixes sont ceux où elle pénètre dans la masse de l'aimant. Cette ligne vient-elle, par une cause extérieure, à subir un allongement, ses points d'attache tendront à se déplacer jusqu'à ramener la ligne de force au minimum de longueur que comportent les conditions générales du système.

La figure 308 montre l'exemple d'un champ de l'action magnétique sur un courant. N et S sont les deux pôles d'un aimant situé au-dessous d'un fil métallique perpendiculaire au plan de la figure et faisant partie d'un circuit fermé. Le courant qui traverse ce conducteur, d'arrière en avant, détermine un champ magnétique, dont les lignes de force sont en projection des circonférences concentriques au fil. Les champs magnétiques de l'aimant et du courant réagissent l'un sur l'autre, et leurs lignes de force se distribuent de manière que, en définitive, leur tendance répulsive fasse équilibre à leur tendance à se raccourcir.

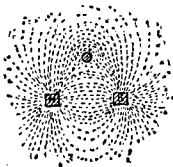


FIG. 308.

(1) Ces appareils, très utiles pour des expériences de cours, sont construits par la maison Bréguet.

La simple inspection de ce fantôme magnétique montre quel sera le mouvement relatif de l'aimant et du conducteur. Les lignes de force qui contournent ce dernier agissent de façon à le diriger vers le bas de la figure. Si le courant était, au contraire, dirigé d'avant en arrière, le conducteur serait sollicité à se déplacer en sens inverse.

Le principe de cette expérience n'est autre que celui de la roue de Barlow et du disque tournant de Faraday.

Les figures 306 et 307 montrent la roue de Barlow et le disque tournant de Faraday. Il suffit de les examiner un instant pour y retrouver tous les éléments de la figure 308 et par conséquent pour en comprendre le jeu.

Réciproquement, si le conducteur est déplacé mécaniquement du haut en bas de la figure, il deviendra le siège d'un courant d'induction dirigé d'avant en arrière, et, s'il est déplacé de bas en haut, le courant induit sera de signe contraire. On sait que la force électro-motrice de ce courant est proportionnelle au nombre de lignes de force coupées par le conducteur en des temps égaux, et le nombre de ces lignes définissant l'intensité d'un champ magnétique en ses diverses régions, on peut dire que l'intensité en un point est proportionnelle à la densité des lignes de force en ce point. Il s'ensuit que la vitesse du déplacement du conducteur devra être d'autant plus grande, pour engendrer un courant de force électro-motrice constante, que ce déplacement s'effectuera dans une région moins intense du champ magnétique.

Ces considérations suffisent pour exposer les divers trains mobiles dont le dernier terme constitue la machine magnéto-électrique de Gramme.

Premier système.

L'appareil consiste (fig. 309) en un conducteur métallique deux fois recourbé à angle droit, porté par son milieu sur la pointe d'un axe vertical X, l'axe de rotation du système. Les branches verticales L et L' plongent par leurs extrémités dans un canal circulaire contenant du mercure MM'. Les cloisons d'ébonite c et c' divisent ce canal en deux parties égales auxquelles aboutissent, par deux bornes, les rhéophores d'une pile. Afin que l'appareil ne trébuche pas, pendant la rotation, lorsque les cloisons c et c' sont rencontrées par ses branches, celles-ci sont terminées par de petits appendices articulés qui se soulèvent facilement à leur passage sur chaque cloison, pour retomber aussitôt dans le mercure adjacent.

Plaçons cet appareil dans le champ magnétique d'un aimant NS, de

telle sorte que le diamètre cc' soit perpendiculaire à la droite qui joint les pôles. Le conducteur se mettra à tourner autour de son axe aussi longtemps qu'il sera traversé par le courant de la pile.

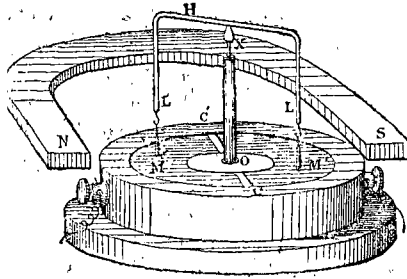


FIG. 300.

Pour expliquer cette rotation, examinons successivement : 1° l'influence des branches verticales L et L' ; 2° celle du fil horizontal H , qui relie ces deux branches l'une à l'autre.

Action des branches L et L' . — La figure 310 représente schématiquement la projection horizontale de l'appareil. La flèche qui accompagne le fil H indique la direction du courant dans ce fil et par conséquent dans les branches verticales.

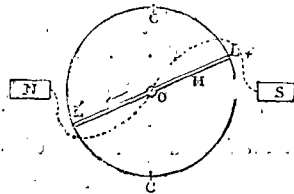


FIG. 310.

L'examen du fantôme magnétique montre immédiatement que le fil L tend à se déplacer vers le bas, et le fil L' vers le haut de la figure. Ces fils trouveront ainsi leurs positions respectives d'équilibre en c et en c' . Mais, par son inertie même, le train mobile dépassera cette position. Chaque branche franchira la cloison d'ébonite et se trouvera aussitôt en contact avec le canal de mercure opposé à celui qu'elle vient de quitter. Les conditions premières d'équilibre sont alors renversées; c'est L qui cherche à atteindre c' , et L' qui se rapproche de c . A chaque demi-tour, la commutation du courant se produira au moment où le système mobile franchit sa position d'équilibre. Le mouvement est donc continu, et la rotation s'effectue dans le même sens.

Action du fil H . — On verrait facilement que cette action est double : 1° elle s'ajoute à celle des branches verticales; 2° elle tend à abaisser tout d'une pièce le conducteur horizontal: la première influence n'a que

des composantes horizontales, et la seconde qu'une composante verticale de nul effet dans l'application qui nous occupe.

Afin de simplifier le langage, M. Bréguet appelle *diamètre de commutation* le diamètre cc' des cloisons.

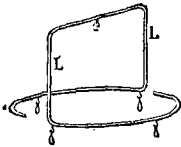


Fig. 311.

On peut modifier le train à deux branches de la manière suivante : les fils verticaux sont prolongés à leur partie inférieure par deux arcs de circonférence dont le plan est horizontal. Ces arcs (fig. 311) portent, chacun en son milieu, un appendice articulé identique à ceux de L et L'. De cette façon, les canaux de mercure peuvent n'occuper qu'un arc de 90 degrés (fig. 313), au lieu de 180 degrés (fig. 312), sans que le courant cesse jamais de circuler dans le circuit, puisque, aussitôt qu'un appendice abandonnera le mercure, l'appendice suivant continuera ses fonctions.

Pour que le conducteur mobile subisse l'influence la plus grande

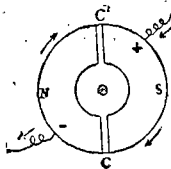


Fig. 312.

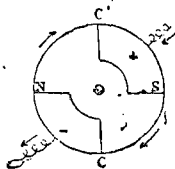


Fig. 313.

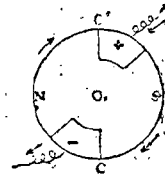


Fig. 314.

possible, c'est-à-dire pour qu'un courant donné le fasse tourner avec la plus grande rapidité, il est indispensable de disposer les secteurs mercuriels en des régions déterminées du champ magnétique. Si l'on considère un plan perpendiculaire à la ligne des pôles de l'aimant et passant par l'axe de rotation, le conducteur devra être parcouru par des courants d'un certain signe à droite du plan et de signe contraire du côté opposé. C'est là la condition de meilleur fonctionnement du système. En effet, si d'un même côté de ce plan le conducteur est traversé, dans deux positions différentes, par des courants contraires, les deux effets se combattront; le moment du couple résultant sera donc diminué. De cette condition générale on peut aisément déduire la position la plus favorable des secteurs. La figure 313 montre cette position dans le cas de la rotation indiquée par les flèches sous l'influence d'un courant allant de + à - et d'un aimant dont le pôle austral est à gauche.

Si, au lieu de deux appendices, les arcs horizontaux de la figure 311 en portent quatre, les canaux de mercure pourront n'occuper que 45 degrés (fig. 314) et en général ces secteurs seront d'autant plus courts

que le nombre des appendices sera plus grand. Leur emplacement le plus avantageux se détermine facilement. Chacun d'eux doit se trouver tout entier d'un même côté du plan vertical de symétrie, et chacun doit reposer contre ce même plan par une de ses extrémités. Si le nombre des appendices augmente de plus en plus, les secteurs finiront par n'occuper que l'espace rempli par les cloisons c et c' dans la première disposition (fig. 309). Les conducteurs mobiles seront d'ailleurs parcourus par un même courant et de la même manière dans les deux cas. On est donc amené à appeler encore *diamètre de commutation* le diamètre qui réunit deux arcs de mercure excessivement petits du système actuel. Cette disposition existe justement dans les appareils électro-magnétiques les plus importants.

Il existe encore une autre variante du premier système, qui réalise un notable progrès, puisqu'elle permet d'obtenir, à l'aide du même courant, une rotation beaucoup plus rapide. C'est celle que repré-

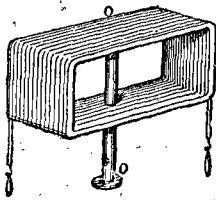


FIG. 315.

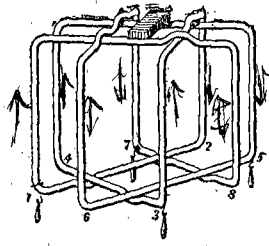


FIG. 316.

sente la figure 315. On voit qu'elle constitue une simple multiplication de l'appareil primitif. Cette multiplication est applicable à tous les circuits dont il reste à parler.

Deuxième système.

Soit un circuit (fig. 316) formé par un seul fil dont les deux extrémités sont soudées l'une à l'autre, de façon à constituer un circuit sans fin. A chaque croisement, les fils sont soigneusement isolés l'un de l'autre. L'enroulement de ce conducteur peut se suivre à l'aide du numérotage des sommets, indiqué sur la figure. Les extrémités inférieures des branches verticales 1 — 3 — 5 — 7 sont terminées par de petits appendices destinés à plonger dans le mercure. L'appareil est d'ailleurs disposé de manière à pouvoir tourner librement autour de son axe de symétrie, lequel axe est vertical. Si le courant extérieur est amené par les appendices 1 et 5, les fils verticaux qui

se trouvent en avant du plan vertical 1.5 seront tous parcourus par des courants d'un même signe, et les fils verticaux situés en arrière du même plan seront tous parcourus par des courants de signe contraire.

Puisque le système actuel possède quatre branches, le champ galvanique mobile sera quatre fois plus intense (avec la même source électrique) que celui de l'appareil à deux branches. Il s'ensuit, si les auge de mercure occupent un arc de 90 degrés, que son action sur le champ magnétique sera plus grande et qu'on aura ainsi réalisé un système tournant plus rapidement que le train à deux branches, sous l'influence d'un même courant, dans un même champ magnétique. En outre, puisque les secteurs mercuriels fournissent ici un courant pendant chaque quart de tour, les impulsions que reçoit le circuit mobile seront deux fois plus nombreuses que lorsque ces secteurs occupaient un arc de 180 degrés, comme dans le premier système.

Cet enroulement réunit donc deux qualités indépendantes de la source du courant et du champ magnétique, à savoir : rotation plus égale et multiplication du champ galvanique. Au lieu de huit conducteurs verticaux, il est aisé d'en avoir un bien plus grand nombre. Le principe de cet enroulement réside dans l'existence d'un polygone étoilé d'un nombre pair de côtés. De tous ces polygones, l'octogone est le plus simple. C'est aussi lui qui a fourni le premier appareil que M. Bréguet a réalisé.

Pour obtenir les meilleurs effets d'un train mobile, les courants positifs doivent tous se trouver d'un même côté du plan vertical de symétrie du champ. La position la plus favorable des secteurs mercuriels est par conséquent bien déterminée. La figure 314 montre cette position dans le cas d'une rotation semblable à celle des aiguilles d'une montre et du sens du courant indiqué par les flèches. L'appareil est supposé avoir seize fils verticaux ; les auge de mercure ne s'étendent alors que sur un angle de 45 degrés. Le sens de l'enroulement n'est pas indifférent. La figure 314 le suppose effectué d'après la figure 316. Autrement, la rotation se produirait en sens inverse.

Au lieu de seize conducteurs efficaces, nous pouvons en supposer un nombre beaucoup plus considérable. Le mercure des auge n'occupera alors que des arcs de plus en plus petits. A la limite, ces auge se réduiront à des arcs infiniment courts, situés en c et en c' .

Il existe encore d'autres modes d'enroulements qui permettent de produire les mêmes effets que ceux qui viennent d'être décrits pour le système de la figure 316.

Les figures 317, 318, 319 et 320 représentent un certain nombre de ces solutions. La première est le squelette de la machine Von Altenek; la seconde a été imaginée par M. Frölich et les deux dernières par M. Bréguet.

La supériorité de l'enroulement (fig. 320) sur les autres consiste dans l'emploi d'une moindre longueur de fil pour produire les mêmes effets. On réduit par là la chaleur développée dans la bobine

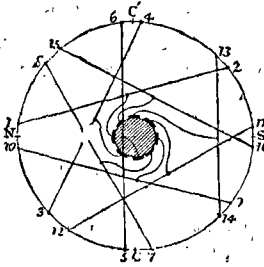


FIG. 317.

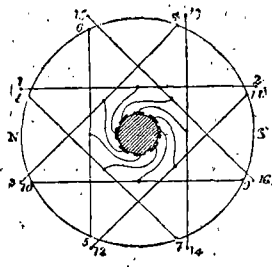


FIG. 318.

par le passage des courants, c'est-à-dire que l'on augmente le coefficient économique de la machine. Or, les fils que l'on doit chercher à raccourcir sont justement ceux qui se croisent sur les bases du cylindre noyau de la bobine : ce sont ceux qui sont visibles sur les

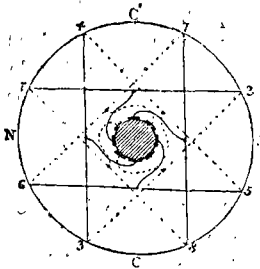


FIG. 319.

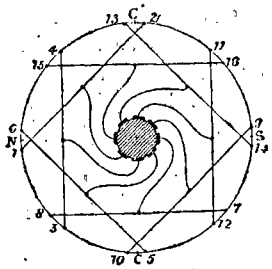


FIG. 320.

figures 317, 318, 319, 320. Les autres parties des conducteurs sont celles qui se projettent suivant les points numérotés; elles sont parallèles à l'axe de rotation, et ce sont elles qui deviennent le siège d'une force électro-motrice lorsque la bobine tourne dans un champ magnétique. On peut donc les appeler fils *efficaces*, et appeler fils

inactifs ceux qui ne servent qu'à relier convenablement, les uns aux autres, tous les fils efficaces.

Dans la figure 320, on voit que les fils inactifs ne traversent les bases supérieures et inférieures que suivant des longueurs respectivement égales au côté du carré et au côté de l'octogone étoilé, inscrits dans ces bases, tandis que, dans les figures 317 et 318, ces mêmes fils sont des diamètres et des côtés d'octogone étoilé.

Le tableau qui suit présente les quatre enroulements dans leur ordre de mérite croissant. La seconde colonne indique en effet la longueur de leurs fils inactifs en fonction du rayon des bases. La longueur des fils efficaces est supposée la même dans tous les cas :

Solution Frölich (fig. 318).	30,8
Solution Alteneck (fig. 317).	30,5
3 ^e solution (fig. 319 et 316).	28,4
4 ^e solution (fig. 320).	26,0

La quatrième solution est donc la meilleure, et celle de M. Frölich la moins favorable.

Ecrans magnétiques.

Avant d'aborder un troisième système, qui n'est autre que la machine Gramme réduite à sa plus simple expression, M. Bréguet étudie le rôle des écrans magnétiques, c'est-à-dire les modifications qu'apporte, dans la distribution des lignes de force d'un champ, la présence de substances magnétiques ou diamagnétiques.

« Deux lignes de force d'égale longueur, mais situées dans des milieux différents, n'ont pas la même longueur au point de vue *magnétique*. Celle qui se trouve comprise dans une substance magnétique est *magnétiquement* plus courte que celle qui se trouve comprise dans une substance diamagnétique, ou, plus généralement, moins magnétique que la première. »

Par suite, dans un champ magnétique, les lignes de force se concentrent sur les substances magnétiques et évitent les milieux diamagnétiques, pour être toujours les plus courtes possibles. Ainsi s'explique l'orientation en long et en large d'aiguilles magnétiques ou diamagnétiques, sous l'influence d'un aimant.

Il en résulte que l'on peut modifier un champ magnétique de manière à rendre son intensité aussi faible qu'on le veut dans une région déterminée.

La figure 321 représente le fantôme magnétique d'un long cylindre creux de fer placé entre les deux pôles d'un aimant. Les lignes de

force tendent à effectuer la plus grande partie de leur parcours dans la masse du fer, ce qui réduit l'influence des répulsions parallèles de ces lignes. Si le cylindre est suffisamment long et épais, il n'y aura pas de lignes de force à l'intérieur. C'est ce qui explique le rôle de

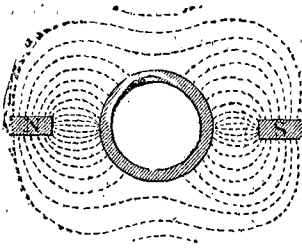


FIG. 321.

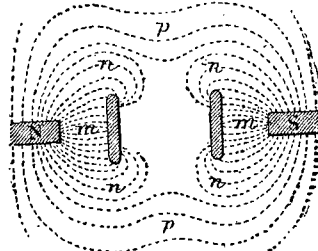


FIG. 322.

l'enveloppe en fer forgé du galvanomètre marin de Thomson (Vol. I, p. 496).

Si le cylindre est court et affecte la forme d'un anneau, quelques lignes de force pénétreront dans son intérieur, en contournant les bords. La figure 322 montre le fantôme pris suivant la coupe diamétrale de l'anneau. On y reconnaît trois groupes de lignes de force, m , n , p , de formes bien différentes.

Les lignes du groupe m , de beaucoup plus nombreuses, vont presque en ligne droite des pôles aux parties de l'anneau situées en regard. Celles du groupe n , bien moins nombreuses, contournent la tranche de l'anneau et pénètrent, en se recourbant, dans sa surface interne. Celles du groupe p ne rencontrent pas l'anneau. D'ailleurs, aucune ligne ne traverse l'anneau de part en part pour aller directement d'un pôle à l'autre.

Troisième système (circuit Gramme).

Si un courant parcourt le conducteur, fig. 323, dans le sens de la flèche, les fils extérieurs 1 et 4 tendront à amener une rotation continue, et les fils intérieurs 2 et 3 une rotation contraire ; mais le premier couple sera plus grand que le second, car les fils 1 et 4 étant plus rapprochés des pôles, la force est plus grande, et la distance de 1 à 4 (bras de levier) est plus grande que celle de 2 à 3. Pour que le système subisse toute l'action du premier couple, il faudrait soustraire les fils intérieurs 2 et 3 à l'influence du champ magnétique. Or, une bague de fer occupant l'espace annulaire compris entre les

circonférences O_1 et O_2 , empêchera les lignes de force de pénétrer dans la région intérieure et fera *écran magnétique* vis-à-vis des fils 2 et 3.

Disposons le circuit de la figure 324 de telle sorte que les fils 1 et 4 soient extérieurs à l'anneau et que les fils 2 et 3 lui soient intérieurs (fig. 324), et recherchons, dans ces conditions, quels seront l'action et le sens des couples qui s'exercent séparément sur les systèmes 1.4 et 2.3. Le rôle de la bague de fer, à l'égard du système 1.4, n'est autre que celui d'une armature ordinaire qui augmente l'intensité du champ; mais ce sont les lignes du groupe α

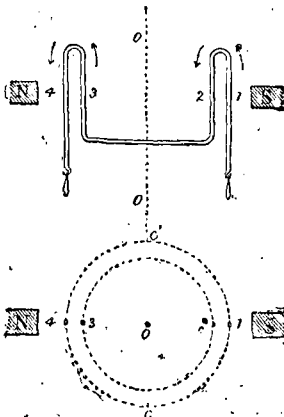


FIG. 323.

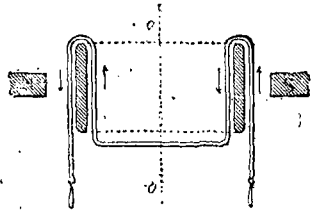


FIG. 324.

qui sont coupées par le fil 2. Or, ces lignes semblent, pour ce conducteur, provenir d'un pôle boréal situé à sa gauche; et, si l'on tient compte de ce que, ici, le courant est descendant, on verra sans peine que le fil 2 tend à se déplacer d'arrière en avant de la figure. On trouverait que le fil 1 est sollicité à se mouvoir de la même manière, car le courant qui le parcourt est ascendant et le pôle austral est à sa gauche.

Ainsi, la présence de l'anneau de fer a changé le signe du couple interne et en a diminué la valeur absolue; d'autre part, elle a augmenté la valeur du couple externe en lui conservant son signe; et cela, quelque petite que soit la distance radiale des fils 1 et 2. Le système sera soumis à l'action de deux couples du même signe. Il se mettra donc à tourner de gauche à droite. C'est ce que l'expérience confirme avec la plus grande netteté.

Nous pouvons supposer, dans l'appareil qui précède, la bague de fer doux solidaire du circuit, et rien ne sera changé dans les effets que nous venons d'analyser. Sous cette dernière forme, il est possible de réaliser une multiplication de l'appareil de la figure 324, qui pré-

sente les mêmes avantages que les enroulements des figures 316, 317, 318, 319 et 320. Nous arrivons ainsi à une sorte de schéma de la machine de Gramme.

La figure 325 montre un anneau de fer doux sur lequel a été enroulé, en quatre spires équidistantes, un fil métallique isolé dont les extrémités sont réunies l'une à l'autre de manière à constituer un circuit sans fin. Les parties inférieures de chacune des spires sont munies d'appendices articulés destinés à plonger, comme plus haut, dans des rhéophores de mercure. Tout le système est libre de tourner autour de son

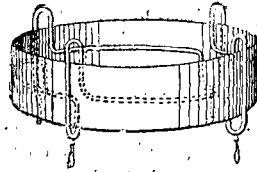


Fig. 325.

axe de symétrie. Les fils verticaux extérieurs et intérieurs à l'anneau exercent des actions identiques quant à leur signe; la rotation s'expliquera absolument comme dans la figure 313.

Au lieu de quatre spires, on pourrait en supposer six, huit, etc.; l'étendue des secteurs mercuriels devrait seulement être réduite en proportion de leur nombre.

Machines dérivant de ces appareils.

La figure 306 donne le principe de la *roue de Barlow*. Le *disque tournant de Faraday*, le *disque de Foucault*, la *machine de M. Le Roux* diffèrent peu de la roue de Barlow, en tenant compte de sa réversibilité.

Pour faire de l'appareil (fig. 315) une *machine à double T de Siemens* ou une *machine de Wilde*, il suffit de donner au circuit une hauteur très grande par rapport à son diamètre et d'introduire dans le cadre de la bobine une armature de fer doux solidaire circuit. Cette solidarité est commandée non par la théorie, mais par la pratique.

En remplaçant chacun des fils des figures 325 et 316 par un écheveau semblable à celui de la figure 315, on obtient les *machines de Gramme et d'Alteneck*. Des frotteurs métalliques, appuyant sur une sorte de rhéotome, remplacent les auges de mercure dans les contacts fixes. Les parties métalliques de ce rhéotome sont reliées aux écheveaux, de la même manière que les appendices articulés des appareils de rotation communiquent avec les spires de leur circuit.

On peut admettre d'ailleurs que les fils extérieurs à l'anneau de fer, dans la bobine Gramme, et les fils parallèles à l'axe de rotation, dans les autres bobines, interviennent seuls dans la production du

courant, ce qui permet de se rendre compte de la valeur relative des modes d'enroulement. L'enroulement Gramme convient mieux à l'armature en forme d'anneau, et celui d'Alteneck à une bobine allongée.

Les machines magnéto-électriques se trouvent ainsi rattachées à la roue de Barlow, laquelle repose sur le principe d'Ampère, à savoir qu'un courant mobile tend à se placer de manière que l'observateur qui le personnifie voie le pôle austral à sa gauche.

Le tambour en fer de la machine d'Alteneck ne sert qu'à renforcer le champ magnétique dans la région où se meuvent les fils de l'induit; l'anneau de fer doux dans la machine Gramme a la même influence, mais son rôle caractéristique est de soustraire le fil interne des spires à l'action normale des lignes de force du champ.

Position dissymétrique des frotteurs.

L'expérience prouve que, pour obtenir d'une machine Gramme les meilleurs effets, il faut déplacer angulairement les frotteurs *dans le sens du mouvement*. C'est la conséquence de la non-instantanéité des phénomènes physiques. Ce phénomène a été constaté dans la machine Clarke, où il est attribué au retard à l'aimantation du fer doux. Mais ce n'est pas la seule cause, car le même fait se présente dans des appareils où n'existe aucune armature de fer doux. On doit l'attribuer aussi à l'induction du courant sur lui-même (extra-courant). Quand l'appareil est employé, non plus comme générateur de courant, mais comme *moteur*, le diamètre des prises de contact doit être déplacé *en sens inverse* de la rotation.

RECHERCHES DE MM. MASCART ET ANGOT (1).

MM. Mascart et Angot ont vérifié expérimentalement qu'entre certaines limites de vitesse, et dans un champ magnétique constant, la force électro-motrice était proportionnelle à la vitesse de rotation. Ils mesuraient la force électro-motrice par rapport à une pile connue, soit par la méthode d'opposition, soit par celle de compensation. Ils ont vérifié également, en faisant varier le nombre des lames d'acier de l'aimant Jamin d'une machine Gramme, que la force électro-motrice est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique dans lequel se meut l'armature. On mesurait l'intensité du champ en remplaçant l'anneau par une bobine reliée à un galvanomètre et dont l'axe était parallèle aux lignes de force, et en notant l'impulsion de l'aiguille

(1) *Journal de physique*, vol. VII, pp. 79 et 363 (1878).

quand on tournait brusquement cette bobine de 130° autour d'une droite perpendiculaire à son axe.

RENDEMENT DES MOTEURS ÉLECTRIQUES.

E étant la force électro-motrice de la pile, e celle d'induction développée par le moteur, i l'intensité du courant, R la résistance totale du circuit, on a (page 334),

$$Eit = i^2 R t + e i t, \text{ d'où } i = \frac{E - e}{R}$$

Eit étant le travail dépensé, $i^2 R t$ l'équivalent de la chaleur dégagée dans le circuit, $e i t$ le travail utile, le rendement économique est $\frac{e i t}{E i t} = \frac{e}{E}$.

V étant la vitesse du moteur, on peut poser, en vertu de la loi de Newmann, $e = K i V$ et, comme $E = e + R i$, le rendement devient $\frac{K V}{K V + R}$, expression qui tend vers l'unité, quand V augmente indéfiniment. Ainsi, à mesure que le mouvement s'accélère, e augmente, et i diminue; le travail du moteur diminue, mais la dépense de zinc de la pile diminue aussi, et, à la limite, le rendement est égal à l'unité; mais alors l'intensité est nulle et le travail nul.

Si l'on met le travail $e i t$ sous la forme $\frac{e(E - e)}{R} t$, la somme des deux facteurs e et $E - e$ étant constante, le travail est maximum quand la vitesse du moteur est telle que $e = 1/2 E$ ou $i = \frac{E}{2R}$, c'est-à-dire quand l'intensité primitive est diminuée de moitié par les effets d'induction. Le rendement est alors $1/2$ (1). Si la vitesse augmente encore, le rendement augmente, parce que l'échauffement du circuit et la dépense du zinc diminuent avec l'intensité, mais le travail produit diminue aussi.

Quand le générateur d'électricité est une machine magnétique ou dynamo-électrique, $\frac{e}{E}$ est le rapport de la force électro-motrice de la machine réceptrice à celle de la machine génératrice (2).

(1) M. Mascart, *Journal de physique*, vol. VI, pp. 203 et 297 (1877).

(2) D'après M. Fontaine, *Éclairage à l'électricité*, p. 147, avec deux machines de Gramme ainsi disposées et dont les arbres moteurs sont munis chacun d'un frein de Prony, on aurait obtenu 0,61 de la force motrice, ce
CORDON. Électricité.

APPAREILS POUR LA MESURE DE L'ÉNERGIE

On a vu (vol. I, p. 521), que la quantité d'énergie qui passe pendant un temps t dans un circuit électrique compris entre deux points A et B était exprimée par $qe = eit = i^2 r t$, q étant la quantité d'électricité qui passe dans le temps t , e la différence de potentiel des deux points, r la résistance qui les sépare et i l'intensité du courant. On peut mesurer directement q en plaçant un voltamètre à sulfate de cuivre en dérivation sur les points A et B, e par un électromètre, i par un galvanomètre ou un électro-dynamomètre (si les courants sont alternatifs) et r par un pont de Wheatstone.

M. Marcel Deprez a construit un *mesureur d'énergie*, fondé sur le principe suivant : si l'on met en dérivation sur le circuit AB = r de l'appareil destiné à utiliser le courant une grande résistance r' , et que i et i' désignent les intensités dans les circuits principal et dérivé, on a $e = i r$ et $e = i' r'$, d'où, pour le travail dans l'unité de temps $ei = i' i' r'$. Si le courant est variable, le travail dans le temps dt sera $r' i' i' dt$, et dans le temps t , ce sera $r' \int i' i' dt$. L'appareil donne par une simple lecture $i' i'$. C'est un électro-dynamomètre, composé d'une bobine fixe, à axe vertical, très large et renfermant un grand nombre de tours de fil fin, et d'une bobine horizontale mobile dans l'intérieur de la première et ne renfermant que quelques tours d'un ruban de cuivre peu résistant. La première constitue le circuit dérivé, la seconde est placée dans le circuit principal. La bobine mobile porte une aiguille verticale qui se meut devant un cadran divisé, et dont le prolongement au-dessous du centre porte une lentille pendulaire produisant une force antagoniste proportionnelle au sinus de l'angle α que l'aiguille fait avec la verticale. On a alors la relation $i' i' f(\alpha) = K \sin \alpha$. Les appareils sont gradués par rapport à un appareil étalon, gradué lui-même en calories ou en kilogrammètres par minute en employant le courant qui traverse le circuit principal à échauffer un calorimètre dont on fait varier la résistance, calculant le nombre de calories et notant la position de l'aiguille. La valeur de l'intégrale $\int i' i' dt$ s'obtient en ajoutant à l'appareil un *totalisateur*.

qui, en tenant compte de la double transformation de travail en électricité et d'électricité en travail, donne pour chaque machine une utilisation de 80 pour 100.

Mesure des forts courants. — Les appareils ordinaires pour la mesure des intensités sont trop délicats pour des courants qui, comme ceux des machines dynamo-électriques, atteignent 20 webers et plus par seconde. Pour les courants continus, on peut employer soit le galvanomètre des tangentes à *cadre mobile*, désigné aussi sous le nom de *galvanomètre des cosinus* (vol. I, p. 484), dont la sensibilité diminue avec l'inclinaison du cadre sur la verticale; soit des *mesureurs* de courants spéciaux.

On peut, en effet, utiliser dans ce but toutes les actions mécaniques des courants sur les aimants (galvanomètres) ou des courants sur les courants (électro-dynamomètres) : les instruments donnent des indications proportionnelles soit à l'intensité, soit au carré de l'intensité, à la condition que les pièces fixes et les pièces mobiles restent toujours dans la même position relative et que l'action du courant ne change pas sensiblement le magnétisme des aimants. Ces conditions sont remplies dans deux appareils de M. Marcel Deprez. L'un d'eux a été décrit (vol. I, p. 509). L'autre est un *mesureur à poids*, qui ne diffère du moteur électrique décrit vol. II, p. 382, que par la suppression du noyau de fer doux de la bobine. Ce noyau de fer doux augmente l'action mécanique du courant; mais, par sa réaction sur l'aimant, il détruit la proportionnalité entre les intensités et les forces mécaniques. Le courant est amené dans la bobine, dont l'axe est mobile sur des couteaux, par deux lames métalliques plongeant dans un godet à mercure à deux compartiments, de façon à ne pas gêner la mobilité de la bobine. A celle-ci est fixé un bras de fer, le long duquel peut glisser un poids curseur destiné à équilibrer le couple produit par le courant. Lorsque le cadre n'est parcouru par aucun courant, ce poids occupe sur le levier une position qui est le zéro de la graduation, et l'intensité d'un courant est proportionnelle à la distance du zéro à laquelle il faut placer le curseur pour ramener le levier dans la position horizontale malgré l'action du courant.

Pour mesurer la différence de potentiel entre deux points d'un circuit, MM. Siemens et Halskè emploient un *galvanomètre de torsion*, dont l'aimant a la forme d'un long dé à coudre, placé verticalement avec l'ouverture en bas. Ce dé est fendu longitudinalement suivant deux génératrices opposées, et les pôles sont constitués par les deux moitiés ainsi formées. Cet aimant, fixé à un axe vertical, peut tourner entre deux bobines très résistantes traversées par le courant. Un ressort en spirale, placé à la partie supérieure, équilibre par sa torsion l'action du courant. L'appareil est gradué de telle sorte que un élément Daniell produise une torsion de 15 degrés : cet angle est la *constante* de l'appareil. Pour mesurer la différence de potentiel

entre deux points A et B d'un circuit, on relie les deux points par un circuit dérivé composé du galvanomètre et d'une boîte de résistances, et on fait varier la résistance de cette dernière jusqu'à ce que l'angle de torsion soit égal à la constante. r étant cette résistance, g celle du galvanomètre, e la différence de potentiel à mesurer, on a les deux relations $e = i(r+g)$ et $1 = ig$, d'où l'on tire $e = \frac{r+g}{g}$, e étant exprimé en éléments Daniell. La résistance du galvanomètre doit être très grande, pour que son introduction en *dérivation* ne change pas sensiblement le courant dans le circuit principal. Si on connaît la résistance R qui sépare les points A et B dans ce dernier circuit, le rapport $\frac{e}{R}$ donnera l'intensité du courant principal.

Pour pouvoir mesurer aussi l'intensité des courants *alternatifs*, MM. Siemens et Halske emploient un électro-dynamomètre de torsion, consistant dans une bobine intérieure fixe à axe horizontal, et un anneau extérieur vertical mobile n'ayant qu'un tour de fil, afin que l'action de la terre soit négligeable et que l'appareil n'ait pas besoin d'orientation. Le courant traverse les deux cadres et tend à dévier le cadre mobile. On contrebalance son action par un ressort de torsion en spirale, dont une extrémité est fixée au cadre mobile et l'autre à une tête de torsion. Les torsions sont proportionnelles au carré de l'intensité. La bobine fixe renferme deux circuits, l'un à gros fil pour les machines à courant continu, l'autre à fil fin et long pour celles à courants alternatifs qui ont plus de tension et moins de quantité.

RECHERCHES DE M. JOUBERT (1).

M. Joubert a étudié les machines à courants alternatifs et en particulier celle de Siemens. Il s'est servi de l'électromètre à quadrants : les deux paires de quadrants sont isolées et l'une d'elles est mise en communication permanente avec l'aiguille. Si dans la formule 1, (vol. I, p. 238), on fait $C = A$, elle se réduit à

$$M = \frac{K}{2} (A - B)^2.$$

La déviation est proportionnelle au carré de la différence des po-

1) *Journal de physique*, vol. IX, p. 297 (1880), et *Comptes rendus*, vol. XCI, pp. 161, 468 et 493.

tentiels des quadrants et par suite indépendante du signe de cette différence.

Si les quadrants sont mis en communication avec deux points, aux potentiels A et B, d'un circuit traversé par un courant continu i , r étant la résistance qui sépare les deux points du moteur, on a

$$ir = A - B.$$

Si entre deux autres points, aux potentiels A' et B', on a un moteur électrique ou tout autre engin qui transforme l'énergie électrique en une autre forme d'énergie, en développant une force électro-motrice propre e , r' étant la résistance du moteur, on a

$$e + ir' = A' - B'.$$

L'énergie consommée entre les points A' et B' aura pour expression

$$i(e + ir') = \frac{(A - B)(A' - B')}{r}$$

et pourra être fournie par l'électromètre.

Si on a affaire à des courants alternatifs se succédant rapidement eu égard à la durée d'oscillation de l'aiguille, celle-ci prend une déviation fixe proportionnelle à la moyenne des valeurs successives de $(A - B)^2$. Cette moyenne est celle que donnerait l'emploi des méthodes calorimétriques ou de l'électro-dynamomètre : la racine carrée de cette moyenne n'est pas identique à la moyenne des premières puissances. Elle suffit pour la pratique ; néanmoins, il est intéressant de connaître la loi de l'intensité en fonction du temps et M. Joubert l'a déterminée pour une machine Siemens à courants alternatifs.

Le principe de la méthode consiste à diviser la période en vingt parties égales, par exemple, correspondant à des intervalles de $\frac{1}{2000}$ de seconde environ et à mesurer l'intensité à chacun de ces instants. A cet effet, un interrupteur placé sur l'arbre de la machine établit à chaque tour un contact très court, $\frac{1}{20000}$ de seconde environ. On peut se servir de l'électromètre et connaître ainsi $A - B$; mais il faut alors 2 interrupteurs parallèles établissant le contact au même instant. On peut aussi se servir du galvanomètre, puisqu'on prend toujours le courant à un même instant de sa période et un seul interrupteur suffit. On applique alors une *méthode de compensation*, consistant dans l'emploi d'une pile et de résistances variables placées dans des circuits dérivés. On trouve ainsi que l'intensité est représentée par une sinusoïde dont l'origine ne correspond pas à la position symé-

trique des balais : cette sinusoïde est déplacée tout d'une pièce dans le sens du mouvement. Dans les conditions de *travail maximum*, l'intensité est constante et le déplacement indépendant de la vitesse, car il a toujours été de $1/8$ de la période pour des vitesses de 400, 700 et 1000 tours par minute. Ce déplacement ne peut tenir qu'à l'induction du courant sur lui-même, puisque la bobine n'a pas de noyau de fer doux. Le courant principal étant de la forme $A \sin x$, le courant induit est de la forme $B \cos x$, et la superposition des deux courants donne un courant $C \sin(x + y)$, ne différant du premier que par l'intensité et par la phase.

L'intensité étant de la forme $A \sin x$, on vérifie facilement que l'intensité moyenne est $\frac{2A}{\pi}$, tandis que la racine carrée de la moyenne des carrés, que fournit l'électromètre ou l'électro-dynamomètre, est $\frac{A}{\sqrt{2}}$: le rapport des deux moyennes est donc $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,1$.

On retrouve cette sinusoïde en mettant le système induit en communication avec un galvanomètre balistique, et observant l'arc d'impulsion obtenu quand on donne à la main au système induit des déplacements successifs égaux et très petits. On mesure ainsi la quantité d'électricité mise en mouvement à chaque déplacement et par suite la force électro-motrice d'induction correspondante. On obtient la même sinusoïde, mais elle occupe cette fois la position normale, les effets d'induction du courant sur lui-même s'annulant dans chacun des déplacements.

L'intensité moyenne du courant peut être représentée par la formule

$$i = \frac{C}{(R^2 + m^2)^{\frac{1}{2}}}$$

R étant la résistance totale du circuit, m une constante qui ne dépend que de la vitesse et varie en raison inverse de la durée de la période, C une autre constante égale au quotient par $\sqrt{2}$ de la valeur maxima de la force électro-motrice de la machine marchant à circuit ouvert mesurée directement, valeur qui dans le cours d'une période est proportionnelle à la vitesse. On en conclut que l'intensité moyenne ne croît pas indéfiniment avec la vitesse, mais qu'elle tend vers une valeur limite, voisine de celle que l'on obtient pour des vitesses modérées et des résistances faibles. Le travail croît d'abord quand la résistance augmente et passe par un maximum dont les conditions peuvent être réalisées soit pour une vitesse, soit pour une résistance donnée.

Pour une intensité donnée du champ magnétique, et quand la machine donne le travail maximum : 1° le retard est égal à $1/8$ de la période entière; 2° l'intensité est constante et égale au quotient par $\sqrt{2}$ du maximum absolu d'intensité; 3° le travail électro-magnétique est proportionnel à la vitesse; 4° la vitesse est dans un rapport constant avec la résistance.

Application des machines dynamo à la télégraphie

Des essais ont été faits à San Francisco par la Western-Union Co, pour substituer les machines dynamo aux piles dans l'exploitation télégraphique. L'appareil consistait en quatre machines Siemens, reliées en série et dont tous les inducteurs sont excités par le courant d'une même machine Siemens indépendante. Le balai + de chaque machine étant relié au balai — de la suivante, on obtient des forces électromotrices de 50, 100, 150 ou 200 Volts, suivant qu'on prend le courant à la 1^{re}, 2^e, 3^e ou 4^e machine. Dans la machine servant à exciter les inducteurs des quatre autres qui fournissent le courant aux lignes, l'armature et les inducteurs sont dans le même circuit. Dans les quatre autres, les armatures sont dans le circuit télégraphique, et les inducteurs dans celui de l'excitatrice.

CHAPITRE XLI

LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE

On obtient la lumière électrique soit par l'*arc voltaïque*, soit par l'*incandescence*.

ÉCLAIRAGE PAR L'ARC VOLTAÏQUE

Lorsqu'un courant électrique d'une intensité suffisante est envoyé à travers deux électrodes de charbon taillées en pointe et placées au contact, on peut, après que le courant a commencé à passer, séparer les pointes par une distance de quelques millimètres, sans interrompre le courant. Dans l'air (1), une lumière brillante jaillit alors entre les deux pointes. La résistance de l'air interposé

(1) On désigne sous le nom d'*arc voltaïque* la portion d'un circuit où se trouve un conducteur gazeux. Cet arc est en général très lumineux, sa couleur dépend du gaz qu'il traverse et son intensité dépend de la densité du gaz. Dans les gaz raréfiés, on n'a qu'une lueur relativement faible. Dans l'air, l'intensité de l'arc voltaïque serait le $\frac{1}{3}$ de celle de la lumière solaire, d'après les expériences de Fizeau et Foucault faites en isolant deux cônes de rayons de même ouverture qui partaient l'un d'un point du soleil, l'autre du point le plus lumineux de l'arc et comparant leur puissance photographique. L'éclat de l'arc résulte surtout du transport de matières incandescentes qui s'effectue d'une électrode à l'autre, et principalement du pôle positif au pôle négatif. Dans le vide, la pointe positive se creuse et diminue de poids, tandis que la pointe négative s'allonge et augmente de volume. Dans l'air, les deux charbons se consomment, mais inégalement. Les deux pointes se trouvant reliées par une chaîne de molécules de vapeur de carbone, les choses se passent en définitive comme si elles étaient reliées par un conducteur plus résistant que le reste du circuit, et qui en conséquence s'échauffe davantage (voy. chap. XLII) : ce qui revient à dire que la lumière produite par l'arc voltaïque et celle due à l'incandescence proviennent de la même cause, la condensation d'une grande quantité de chaleur dans un espace très restreint.

diminue beaucoup par l'échauffement; si le courant est interrompu un instant, l'arc voltaïque ne peut être rétabli qu'en ramenant les deux pointes au contact, car une force électro-motrice, suffisante pour vaincre la résistance de l'air chaud, ne l'est plus pour vaincre celle de l'air refroidi. La lumière continuant, les charbons brûlent et par suite leur distance augmente. Pour empêcher qu'elle n'augmente au point d'arrêter le courant, il faut rapprocher les charbons, et dans la pratique, il importe que ce rapprochement s'effectue de manière que le point lumineux soit fixe, c'est-à-dire que l'ouverture qui sépare les deux pointes reste sensiblement à la même place. C'est l'objet des *régulateurs ou lampes électriques*.

Ces appareils doivent être munis d'un mécanisme tel que, si l'arc voltaïque s'éteint pour une cause quelconque, les charbons reviennent au contact, rétablissent l'arc, puis s'écartent de nouveau à la distance normale correspondant à la plus grande intensité. Les régulateurs sont munis dans ce but d'un déclanchement électro-magnétique.

La force électro-motrice nécessaire pour produire une bonne lumière électrique est d'au moins 80 Volts, et la résistance du circuit extérieur à l'arc voltaïque ne doit pas dépasser 12 à 15 Ohms; avec 40 éléments de Grove ou 50 éléments Daniell; modèle Thomson ou Reynier (voir vol. I, p. 458), on a une lumière suffisante pour les besoins d'une conférence; mais, pour obtenir une lumière intense, il faut employer des machines dynamo mues par une machine à vapeur.

Lorsque l'arc voltaïque est produit par un *courant continu*, le charbon positif s'échauffe beaucoup plus que le charbon négatif, et s'use environ deux fois plus vite. Le charbon négatif s'use en pointe, tandis que le charbon

positif se creuse en forme de cratère, au fond duquel se trouve le foyer lumineux (1).

Avec des courants *alternatifs*, les deux charbons s'usent également et leurs extrémités sont en forme de pointe (2).

Les foyers à arc voltaïque se divisent en deux catégories : 1° les *régulateurs* ou *lampes*, dans lesquels les électrodes de charbon sont placées bout à bout ; 2° les *bougies*, dans lesquelles les charbons sont placés parallèlement l'un à l'autre.

Régulateurs électriques.

Il existe un très grand nombre de régulateurs automatiques. Nous décrirons seulement les plus usuels.

Régulateur Foucault-Duboscq. — En 1848, Foucault

(1) Ce cratère du pôle positif fournit 65 pour 100 de la lumière totale de l'arc. Cette propriété est utilisée pour envoyer le plus de lumière possible dans une direction donnée. Quand le charbon supérieur est positif, il agit comme réflecteur pour renvoyer la lumière sur le sol. Dans l'éclairage des phares en Angleterre, on place le charbon inférieur, qui est le négatif, de façon que son axe soit dans le prolongement de l'arête du charbon positif situé du côté de l'horizon que l'on veut éclairer. Le charbon positif se creuse alors en surface concave qui renvoie la lumière dans la direction voulue, sans qu'elle soit gênée par les rebords du cratère.

M. Williams Siemens a eu l'idée de diminuer beaucoup l'usure du charbon négatif, en le refroidissant artificiellement. Il forme le pôle négatif d'un cône creux de cuivre, et il lance dans l'intérieur du cône un jet d'eau froide. Ce cône négatif reste ainsi fixe dans l'espace, puisqu'il ne s'use pas, et le charbon positif a seul besoin d'être réglé.

(2) A chaque changement de sens du courant, l'intensité passe par zéro ; néanmoins, la lumière paraît continue, ce qui est dû d'une part à la persistance des impressions de la lumière sur la rétine, et d'autre part à ce que l'incandescence des charbons ne cesse pas immédiatement avec le passage du courant. Bien qu'il suffise d'un souffle pour éteindre l'arc, qui ne peut être rallumé alors qu'en remettant les charbons en contact, l'arc se rétablit néanmoins à la distance de 3 millimètres, après une interruption de courant qui peut atteindre $1/25$ de seconde, soit que l'air qui sépare les pointes n'ait pas eu le temps de se refroidir, soit que la vapeur de carbone qui s'y trouve subsiste encore pendant l'interruption. La durée des interruptions, dans la machine de l'Alliance, ne dépasse pas un dix-millième de seconde.

eut l'idée de rendre fixe le point lumineux en utilisant les variations d'intensité produites dans le courant par les variations de distance des deux charbons. Dans son appareil (fig. 326), construit et perfectionné par M. Duboscq, les deux porte-charbons sont sollicités à se rapprocher par un mouvement d'horlogerie, que commande un électro-aimant traversé par le courant électrique. Une détente reliée à l'armature arrête ou laisse défiler le rouage, suivant que l'intensité du courant augmente ou diminue. Si la distance des charbons augmente par l'usure, l'armature de l'électro-aimant obéit à un ressort antagoniste qui lâche la détente et les charbons se rapprochent; mais alors la résistance diminuant, l'intensité augmente, l'armature est attirée et le mécanisme arrêté (1).

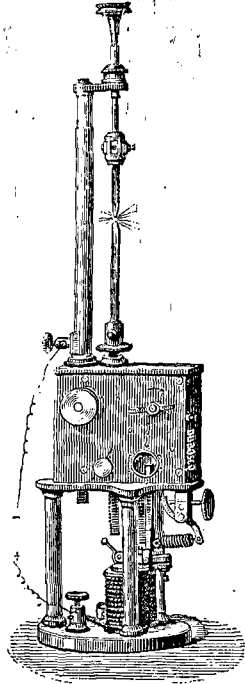


FIG. 326.

(1) L'électro-aimant est à la partie inférieure de l'appareil; le ressort antagoniste de l'armature est un boudin qu'on tend à l'aide d'une vis de réglage, de telle sorte que l'armature ne soit attirée que lorsque le courant a une intensité déterminée. Au-dessus de l'électro-aimant se trouve une boîte cubique renfermant le mouvement d'horlogerie qui actionne les tiges des deux porte-charbons. Celles-ci, taillées en crémaillères sur les côtés en regard, engrenent avec deux roues fixées sur le même axe. La roue qui agit sur le charbon positif a un diamètre double et un nombre de dents double de l'autre pour que ce charbon parcoure un chemin double en raison de son usure double. Une tige oscillante, commandée par l'armature, arrête le mouvement en embrayant les ailettes d'un volant, lorsque les charbons sont à la distance voulue.

Dans l'appareil primitif, il fallait écarter à la main les charbons pour ré-

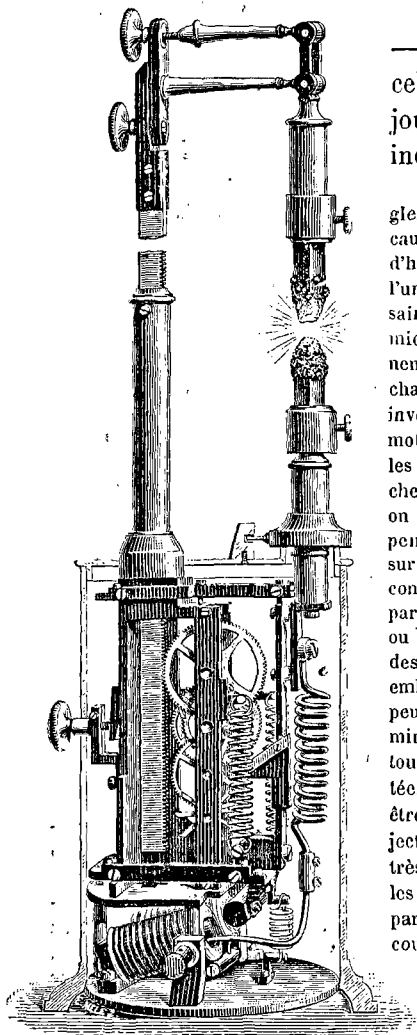


FIG. 327.

des vitesses relatives des charbons suivant que l'on opère avec l'une ou l'autre des deux sources d'électricité.

Régulateur Serrin-Suisse.

— Le régulateur Serrin est celui qui a reçu jusqu'à ce jour le plus d'applications industrielles; les ressorts mo-

gler leur position et leur distance; Foucault a ajouté un second mécanisme d'horlogerie pour écarter les charbons l'un de l'autre, quand cela est nécessaire: ce mécanisme agit comme le premier sur les roues dentées qui engrènent avec les crémaillères des porte-charbons, mais son mouvement est inverse. L'appareil renferme donc deux moteurs distincts, l'un pour éloigner les charbons, l'autre pour les rapprocher. Par l'emploi d'une roue à satellites, on a pu rendre les deux moteurs indépendants et les faire agir inversement sur les mêmes roues dentées. La tige commandée par l'armature se termine par une ancre qui, en oscillant à droite ou à gauche, débraye l'un ou l'autre des volants à ailettes, lesquels sont embrayés quand elle est verticale. On peut exhausser ou abaisser le point lumineux pendant la marche, en faisant tourner à la main une des roues dentées du barillet principal, ce qui peut être utile dans les expériences de projection. L'usage de ce régulateur est très répandu dans les laboratoires et les théâtres; il est en général alimenté par une pile ou toute autre source de courant continu. Pour employer les courants alternatifs, il faut rendre égale la marche des charbons, qui avec le courant continu est combinée dans le rapport de 1 à 2. Une addition permet d'opérer le changement

teurs sont supprimés et c'est le poids du porte-charbon supérieur (positif) qui produit le rapprochement des charbons. L'appareil a été simplifié par M. Suisse, qui le construit aujourd'hui dans des conditions très économiques : ce modèle est représenté dans la figure 327 (1).

Régulateurs à division. — Lorsque la distance des charbons est réglée par l'intensité du courant dans le circuit, il est difficile d'obtenir la division de la lumière, car toutes les lampes placées dans un même circuit sont solidaires les unes des autres. Si dans l'une d'elles l'arc s'allonge trop, l'intensité du courant diminue dans tout le circuit, et les électro-aimants fonctionnent de façon à

(1) Le régulateur Serrin remplit toutes les conditions auxquelles doit satisfaire un bon régulateur : les charbons restent au contact, quand le courant ne passe pas; ils s'écartent à la distance voulue dès que le courant est établi, puis se rapprochent graduellement sans arriver au contact. Si par une cause accidentelle l'arc est rompu, ils sont ramenés automatiquement au contact et s'écartent de nouveau. A cet effet, le porte-charbon supérieur (positif) constitue une crémaillère agissant sur une série de mobiles dont le dernier est une roue étoilée. Quand les deux charbons sont au contact, l'électro-aimant placé au bas de l'appareil et traversé par le courant attire son armature : un parallélogramme articulé, commandé par celle-ci, descend alors en entraînant le charbon négatif inférieur et arrête la descente du charbon positif supérieur en embrayant la roue étoilée. Les charbons s'écartant, l'intensité du courant diminue et le parallélogramme, remontant sous l'action de deux ressorts qui le supportent, déclanche la roue étoilée, d'où rapprochement des charbons. La vis placée sur la gauche de la figure sert à régler le ressort antagoniste de l'armature.

En donnant à la crémaillère une grande longueur, on peut employer des charbons d'une durée de 16 heures; à cet effet, l'appareil Suisse a sa base percée d'un trou dans lequel la crémaillère passe dans sa descente. Le point lumineux descend à mesure que les charbons s'usent; mais cela n'a pas d'inconvénients pour l'éclairage des ateliers. On peut rendre ce point fixe dans l'espace en faisant descendre le pôle positif et monter le pôle négatif dans le rapport de 2 à 1.

L'appareil est le plus souvent alimenté par une machine Gramme à courant continu, type d'atelier. Mais M. Serrin a aussi modifié sa lampe de façon à lui permettre de fonctionner avec les courants alternatifs, ce qui est employé dans les phares.

rapprocher les charbons dans toutes les lampes, même dans celles qui étaient bien réglées et cessent alors de l'être. Si une des lampes s'éteint, toutes les autres s'éteignent aussi, puisque le circuit est coupé.

Pour la division de la lumière, il faut que dans chaque lampe le réglage soit indépendant des variations du courant dans le circuit. Le principe des régulateurs à division

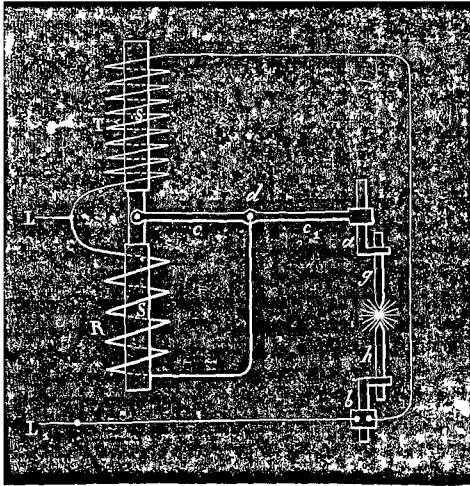


FIG. 328.

consiste à placer l'électro-aimant qui règle l'écartement des charbons, non pas dans le circuit de l'arc voltaïque, mais en dérivation sur cet arc. On lui donne une résistance assez grande pour que le courant passe presque tout entier par les charbons, quand ils sont à la distance convenable. Dès qu'ils s'écartent trop, l'intensité augmente dans la dérivation, l'électro-aimant fonctionne et déclenche le mécanisme de rapprochement des charbons. Si une lampe s'éteint, le courant passe en entier par la dérivation et ali-

mente les autres lampes. Ainsi, dans chaque lampe, le réglage ne dépend que du rapport des résistances de l'arc et de la dérivation et non de la valeur absolue du courant qui se bifurque entre les deux circuits.

Les régulateurs Lontin et de Mersanne (1), ainsi que la lampe différentielle de Siemens sont fondés sur ce principe.

Lampe différentielle de Siemens.
La figure 328 montre le principe (2)

(1) Ces régulateurs sont employés avec la machine à division de Lontin; une seule machine peut alimenter ainsi dix-huit foyers disposés en six circuits de trois lampes chacun (gare de Lyon, à Paris).

Le régulateur de M. de Mersanne est disposé de façon à donner une lumière de 16 heures. Les charbons sont très longs, mais une partie seulement de la longueur est intercalée dans le circuit, pour ne pas trop augmenter la résistance.

(2) Le courant arrivant en L se divise en deux parties : l'une traverse une bobine à gros fil et à faible résistance R, arrive au porte-charbon a, passe par l'arc voltaïque compris entre les charbons g, h et va par bL à la lampe suivante; l'autre traverse une bobine T à fil fin et très résistant et rejoint la première en b. Les deux bobines sont montées sur un même tube en cuivre dans l'intérieur duquel est mobile une tige de fer doux Ss, qui pénètre ainsi dans le milieu des deux bobines. Le porte-charbon supérieur a est fixé à une extrémité d'un levier cc, mobile autour du point d, et dont l'autre extrémité est fixée à la tige Ss. Pour un écartement déterminé des charbons g, h, le rapport des résistances des deux circuits sera tel que, sous l'action des bobines R et T, la tige Ss, et par suite le levier cc, prendra une certaine position d'équilibre.

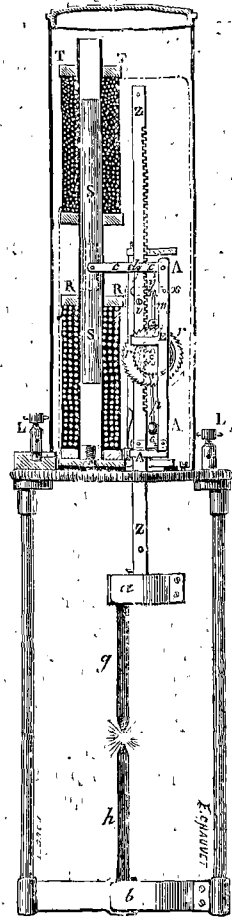


FIG. 329.

et la figure 329 représente la disposition réelle de cette lampe, dans laquelle le moteur est le poids du porte-charbon supérieur (1). Le charbon inférieur étant fixe, le point lumineux descend au fur et à mesure que les charbons s'usent; mais, comme tout le mécanisme de la lampe est placé au-dessus des charbons, rien ne vient faire ombre ni intercepter les rayons lumineux lorsque la lampe est suspendue.

Avec une machine Siemens à courants alternatifs de 12 bobines, on peut alimenter 20 lampes; les charbons peuvent avoir 0^m,01 de diamètre et 0^m,20 de long et durent alors de quatre à cinq heures.

Autres régulateurs. — Parmi les autres régulateurs, les

Si la résistance de l'arc augmente, l'équilibre est détruit, l'action de la bobine T l'emporte, la tige Ss remonte, le charbon *g* descend et se rapproche du charbon fixe *h*. L'inverse se produit si la résistance de l'arc vient à diminuer.

(1) Le circuit est attaché aux bornes L, Li. La pince *a* qui porte le charbon supérieur est fixée au bas d'une crémaillère *z*, qui peut se mouvoir verticalement dans l'intérieur du parallélogramme *cc₁AAc₂* et dont le mouvement est réglé par l'échappement *rE* et le pendule *p*. Tant que l'action de la bobine R est prépondérante, la pièce A est dans sa position haute, dans laquelle l'extrémité *m* du pendule *p* est engagée dans l'entaille *y* du petit levier *xy*; la crémaillère est alors solidaire de la pièce A et suit ses mouvements verticaux. Mais si l'action de la bobine T l'emporte, la tige S monte et le levier *cc₁* fait descendre la pièce A: l'extrémité libre du levier *xy* touche alors un taquet fixe, le pendule *mp* est dégagé et la crémaillère descend en vertu de son poids, jusqu'à ce que la bobine R, rappelant de nouveau en bas la tige S, l'extrémité *m* du pendule s'engage encore dans le cran *y* et rende la crémaillère solidaire de la pièce A, qui reprend sa position haute et produit ainsi l'écartement des charbons. Une petite pompe à air, reliée au parallélogramme mobile, agit comme frein et empêche les mouvements trop brusques.

Si l'arc est interrompu par une cause quelconque, la bobine T attire brusquement la tige S, ce qui ferme un contact de sûreté en platine, placé à la partie inférieure de A, et permet au courant de continuer sa marche dans le circuit général jusqu'à ce que la crémaillère soit descendue assez pour que la lampe se rallume d'elle-même ou que l'on ait remplacé les charbons s'ils sont usés. En déplaçant la bobine T le long du tube en cuivre, on fait varier son action sur la tige S, et on peut ainsi régler la longueur de l'arc.

plus employés sont ceux de Carré en France, Jaspar en Belgique, Siemens en Prusse, Crompton et Rapiéff en Angleterre, Brush et Wallace-Farmer en Amérique, etc. (1).

(1) Les régulateurs automatiques forment plusieurs catégories :

1° *Régulateurs mus par des ressorts*, comme celui de Foucault-Duboseq ;

2° *Régulateurs mus par le poids du charbon supérieur* : Serrin, Serrin-Suisse, Carré, Lontin, Siemens, Crompton, Thomson et Houston, Hiram-Maxim, etc.

La *lampe Carré* est destinée surtout aux courants alternatifs : une armature, en forme de S couché, oscille autour d'un point central ; ses extrémités sont attirées dans l'intérieur de deux bobines courbes, quand le courant passe. Quand le courant est interrompu, l'armature obéit à des ressorts antagonistes et déclanche le mécanisme de rapprochement des charbons.

Dans le régulateur *Siemens* ou *Hefner-Alteneck*, pour courant continu, le poids du porte-charbon positif rapproche les charbons et l'action du courant sur un petit moteur électro-magnétique les écarte.

M. *Crompton* dispose sur l'armature principale de l'électro-aimant une seconde armature plus légère. La première produit l'écart des charbons et la seconde leur rapprochement. Le charbon négatif est solidaire de l'armature principale, qui produit l'écart quand le courant passe et prend une position fixe ; si l'arc est rompu, un ressort de rappel fait remonter l'armature, et le contact des charbons étant rétabli, l'arc se rallume. Les petites variations d'intensité réagissent sur l'armature légère, liée à l'armature principale et suspendue à un ressort de réglage en spirale. Cette petite armature porte un bras coudé qui fait frein sur une roue placée sur le dernier mobile du mécanisme de rapprochement des charbons. Il en résulte que, pour rapprocher les charbons d'une très petite quantité, il faut un très grand nombre de déclanchements successifs, et que le mouvement étant ainsi à peu près continu, la lumière est très constante. Le foyer lumineux est au-dessous du mécanisme, comme dans la lampe différentielle de Siemens.

Dans le régulateur *Thomson et Houston*, la lumière est produite par une étincelle d'extra-courant, ce qui permet l'emploi de courants trop faibles pour produire directement un arc voltaïque. Le charbon inférieur négatif est porté par l'armature d'un électro-aimant, laquelle vibre par un mécanisme de tremblement électrique. A chaque vibration, il touche le charbon positif fixe et s'en écarte. Comme il y a 25 à 30 vibrations par seconde, la lumière paraît continue.

Dans le régulateur *Hiram-Maxim*, les charbons se rapprochent très vite si le courant ne les traverse pas, très lentement si le foyer est allumé.

3° *Régulateurs équilibrés à solénoïdes* : Archereau, Gaiffe, Jaspar, Brush, etc. Le principe est dû à M. Archereau (1848). Le charbon supérieur est fixe ; le charbon inférieur ou négatif, adapté à un cylindre, moitié cuivre, moitié fer, qui pénètre dans une bobine traversée par le courant, est équilibré par un contre-poids. L'attraction de la bobine, quand le courant passe, écarte les

Bougies électriques.

Dans les bougies électriques, les charbons sont placés *parallèlement* et non pas bout à bout, comme dans les régulateurs, ce qui supprime tout mécanisme.

Bougie Jablochhoff. — La bougie Jablochhoff (fig. 330) se

charbons et l'action du contre-poids les rapproche quand l'intensité diminue.

Le régulateur *Jaspar*, dans lequel le poids du charbon supérieur produit le rapprochement, et l'action d'une bobine l'écart, est caractérisé par les points suivants : 1° une tige latérale, plongeant dans un cylindre à mercure, empêche les mouvements brusques du charbon et donne un bon contact au charbon négatif; 2° un contre-poids à action variable permet de placer un régulateur quelconque sur un courant plus ou moins intense; 3° un contre-poids mobile règle à chaque instant l'action du solénoïde et conserve à l'arc la même longueur pendant toute la durée des crayons.

4° *Régulateurs à charbons obliques.* — La lampe *Rapieff*, qui éclaire les ateliers du *Times*, comprend deux paires de charbons, formant un X ou mieux deux V opposés par les sommets, le V inférieur ou renversé se trouvant dans un plan perpendiculaire au plan de l'autre : l'arc voltaïque se forme entre leurs pointes. Dans chaque paire, les charbons, à mesure qu'ils se consomment, se rapprochent lentement l'un de l'autre sous l'action d'un poids, en sorte que le sommet de chaque V est un point fixe. Quand le courant passe et que les quatre charbons sont au contact, un mécanisme électro-magnétique placé dans le socle écarte les sommets des deux V à la distance nécessaire pour la formation de l'arc. Les contacts électriques se font par des galets qui guident les charbons, en sorte que la résistance introduite est faible et indépendante de la longueur des charbons. Ces lampes s'emploient avec des courants alternatifs et on peut en disposer quatre en série dans le même circuit.

5° *Régulateurs à plaques de charbon.* — Dans le système *Wallace-Farmer*, les baguettes de charbon sont remplacées par de larges plaques aux bords taillés en biseau et placées l'une au-dessus de l'autre; celle du bas étant fixe, et l'autre portée par l'armature d'un petit électro-aimant. Le passage du courant écarte les plaques, l'arc jaillit au point où la résistance est la plus faible, puis se déplace le long des bords; puis les plaques se rapprochent un peu, et la lumière reprend le chemin inverse. Il est clair qu'on a une très grande durée.

6° *Régulateurs à charbon circulaire.* — *M. Harrison* (1857) a imaginé un régulateur électro-magnétique dans lequel l'électrode positive est constituée par un cylindre de charbon tournant, afin que l'usure ne se produise pas toujours au même point.

7° *Régulateurs à écoulement d'un fluide* : mercure, air, huile, etc.

compose de deux crayons de charbon parallèles, séparés par une substance isolante susceptible de se consumer en même

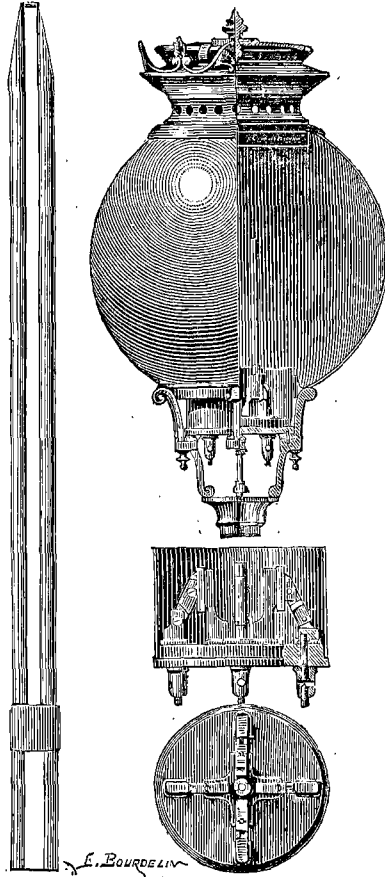


FIG. 330.

FIG. 331.

temps que les charbons, en sorte que tout le système brûle et s'use en même temps, comme le ferait une bougie stéarique. L'extrémité inférieure de la bougie s'engage dans

deux petits tubes de laiton séparés aussi par un isolant. L'extrémité supérieure est trempée dans une pâte de charbon qui adhère très bien et forme une bande de charbon qui rougit d'abord et sert d'amorce à l'arc voltaïque. Pour avoir une usure égale des deux charbons, il faudrait, avec un courant continu, que le charbon positif eût une section double du charbon négatif; mais alors ce dernier, beaucoup plus résistant, rougirait sur une grande longueur. Il est préférable d'employer des charbons égaux et de se servir de courants alternatifs, et c'est ce que l'on fait (1).

(1) La matière qui sépare les deux charbons, ou *colombin*, doit posséder plusieurs qualités : elle doit bien isoler à froid, devenir sensiblement conductrice à la température de l'arc voltaïque, pour fournir au courant un passage assuré; ne pas éprouver de retrait à la chaleur, pour ne pas se détacher des charbons, et brûler dans la même proportion que ceux-ci, pour se maintenir à hauteur de leurs pointes. A l'origine, on se servait de kaolin, qui fondait en laissant à la surface une goutte liquide conductrice; mais de cette façon on abstrait beaucoup de chaleur au détriment de la lumière. Aujourd'hui, on emploie un mélange par parties égales de sulfate de chaux (plâtre) et de sulfate de baryte, qui, au lieu de fondre, se volatilise dans l'arc et augmente la lumière. On le travaille comme le plâtre et on en fait des moules. Les tubes de laiton dans lesquels on engage la bougie forment une pièce distincte, afin de pouvoir remplacer la bougie sans y toucher : ils sont séparés par un colombin formé de plâtre et de magnésie, qui est très isolant.

On a essayé divers systèmes de commutateurs automatiques : le plus simple consiste en un fil métallique placé à la base de la bougie; il fond quand il est atteint par l'arc voltaïque, et un ressort attaché à ce fil se détend et établit un contact qui envoie le courant dans la bougie voisine. On essaie en ce moment une lame-ressort acier et cuivre, qui, se dilatant par la chaleur de l'arc, quand la bougie est consumée, touche une des branches d'une étoile en cuivre placée au centre de la base du chandelier et reliée à un électro-aimant : le courant est alors dérivé dans cet électro-aimant, et produit le déclenchement d'un appareil qui coupe le circuit de la bougie usée et ferme le circuit d'une autre bougie.

On a essayé aussi de supprimer le commutateur et de relier toutes les bornes positives à un même conducteur, et toutes les bornes négatives à un autre conducteur. Le courant allume d'abord la bougie la moins résistante, et, quand elle est consumée, passe à la moins résistante des autres, et ainsi de suite; mais une partie notable du courant se perd par les dérivations à travers les bougies non allumées.

Une machine auto-excitatrice de Gramme, à quatre circuits, peut alimenter

La figure 331 montre un porte-bougies avec un appareil complet disposé pour être placé sur une colonne ou à l'extrémité d'une console. Les bougies, serrées contre les mâchoires d'une pince à ressort, sont placées au nombre de quatre sur un support en onyx, muni de cinq bornes : une centrale, réunie à un des pôles de la machine et aux quatre parties intérieures des mâchoires, les autres communiquant successivement toutes les quatre avec l'autre pôle de la machine par l'intermédiaire d'un commutateur à main. Un cylindre en verre dépoli enveloppe les pinces.

On place quatre chandeliers ou porte-bougies dans le même circuit, et on allume d'abord une bougie de chacun d'eux. Quand elles sont consumées, on fait passer le courant dans les suivantes à l'aide du commutateur. Les bougies sont enfermées dans un globe diffusant, qui masque le déplacement du point lumineux. C'est la disposition adoptée pour l'éclairage de l'avenue de l'Opéra à Paris et des quais de la Tamise à Londres.

Bougie Wilde. — La bougie Wilde (fig. 332) est formée de deux charbons égaux et parallèles, l'un fixe et l'autre mobile. Celui-ci est en rapport par un levier avec l'armature d'un électro-aimant. Le courant est amené d'un côté au charbon fixe, de l'autre au charbon mobile en passant par l'électro-aimant. Lorsque le courant ne passe pas dans l'appareil, le charbon mobile s'appuie librement sur le

vingt bougies, soit cinq bougies par circuit. Dans l'éclairage des quais de la Tamise, on aurait pu, à titre de curiosité, allumer et entretenir une bougie à 14 kilomètres de la source électrique; en général, on ne dépasse pas 150 mètres. Avec des crayons de 0^m,004 de diamètre et 0^m,22 de long, les bougies ont une durée de une heure et demie.

Dans la bougie de M. de Méritens, employée avec sa machine, le plâtre est abandonné; mais entre les deux charbons principaux se trouve une troisième baguette isolée de charbon.

Dans les systèmes Wilde et Jamin, on supprime tout isolant.

charbon fixe; mais, lorsque le courant est établi, l'armature

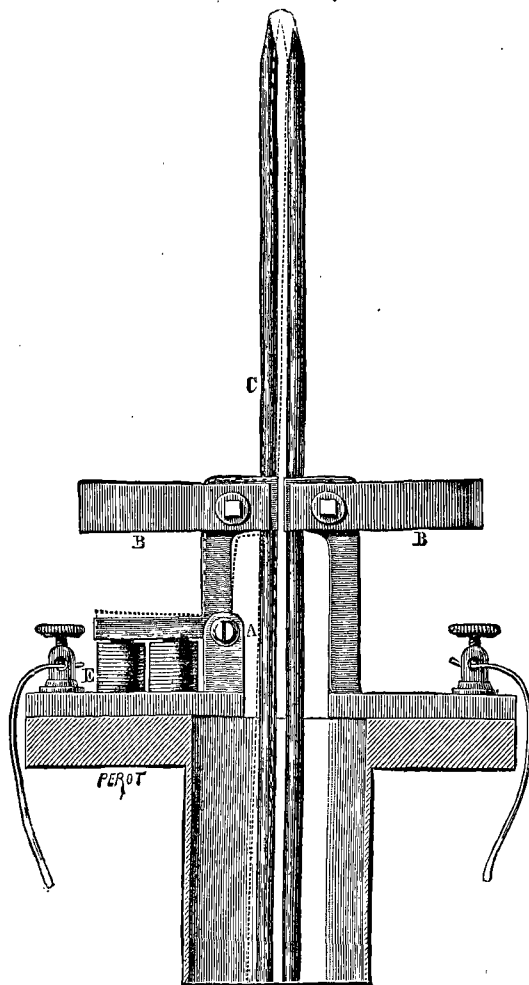


FIG. 332.

est attirée et les deux charbons reprennent le parallélisme

pour le conserver pendant toute la durée du courant. Avant l'allumage, le circuit est donc fermé par le contact des charbons ; lorsque le courant est lancé, les charbons s'écartent, l'arc jaillit entre leurs pointes et s'y maintient même quand la bougie est renversée. Si un foyer s'éteint, les charbons reviennent au contact et la bougie se rallume. On peut placer plusieurs bougies dans le même globe, et les allumer successivement soit à la main, soit à l'aide d'un commutateur automatique. Les courants alternatifs sont fournis par la machine de l'Alliance (pl. L) ou celle de Wilde (pl. LI).

Bougie Jamin. — Dans la bougie de M. Jamin (1879), les charbons égaux et parallèles, qui constituent la bougie, sont placés au milieu et dans le plan d'un cadre *directeur* formé de 40 tours de fil de cuivre fin et isolé. Les courants alternatifs de la machine passent dans le cadre et traversent les charbons dans une direction parallèle à celle qu'ils ont dans les côtés voisins du cadre. Si, par exemple, à un moment donné, le courant est descendant dans les fils de gauche et ascendant dans ceux de droite, il descend aussi dans le charbon de gauche et remonte par celui de droite. Il en résulte que si on produit l'amorçage, en touchant les deux charbons en un point quelconque de leur longueur par un troisième charbon, l'arc voltaïque, qui n'est autre chose qu'un élément de courant, sera sollicité, conformément aux lois d'Ampère, par l'action concourante des quatre côtés du cadre, et se transportera rapidement à l'extrémité des charbons, où il restera, quelle que soit la position de la bougie.

La figure 333 représente la dernière forme donnée par M. Jamin à son brûleur (1880) : le brûleur renferme 3 bougies ou couples de charbons. Les charbons sont engagés dans un support tubulaire de cuivre, où ils se tiennent

verticalement, serrés par un ressort, la pointe en bas ; dans chaque couple, l'un est fixe et l'autre mobile, et le système d'allumage est analogue à celui de la bougie Wilde (1).

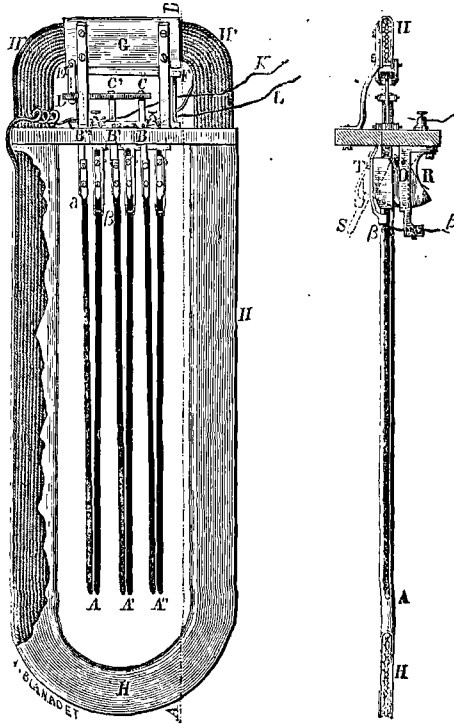


FIG. 333.

1) Dans chaque bougie, les charbons de droite sont fixes et verticaux ; ceux de gauche, *a*, pendent librement autour des articulations *B*, *B'*, *B''* ; les sommets de leurs supports sont reliés par une barrette *CC'* qui leur imprime un mouvement commun. Cette barrette est rattachée par un levier *ED* à une palette de fer doux *EF*, dont le poids pousse la barrette vers la gauche, ce qui rapproche les charbons de chaque couple jusqu'à ce que l'un d'eux vienne buter contre l'autre charbon du même couple. Le contact ne se fera que pour une seule des bougies, la plus longue ou celle dont les pointes sont le plus rapprochées ; c'est celle qui s'allumera. Le courant, après avoir traversé le

ÉCLAIRAGE PAR L'INCANDESCENCE

Dans ce mode d'éclairage, la lumière est produite par la haute température à laquelle est portée par le passage du courant une partie très résistante du circuit. Cette partie est constituée tantôt par un fil de platine, de platine-iridium ou d'iridium, roulé en spirale de façon à concentrer la chaleur sur un très petit espace, ou par une baguette de char-

circuit directeur, arrive à la fois aux trois charbons mobiles et peut revenir indifféremment par les trois charbons fixes : il passe entre ceux qui se touchent et les allume. Aussitôt la gouttière de fer doux G, traversée par les fils du cadre, s'aimante et attire la palette EF; les trois couples de charbon s'écartent à la fois, deux restant froids et l'arc s'étalant entre les pointes du troisième où il est maintenu par l'action du courant directeur. Quand le courant s'arrête, la palette retombe et le contact se rétablit; s'il passe de nouveau, les charbons se rallument et s'écartent. Quand la première bougie est consumée, il faut qu'une autre lui succède : à cet effet, le porte-charbon de gauche est articulé à son sommet et peut se déplacer perpendiculairement; il est poussé par un ressort R qui l'écarte; mais il est maintenu dans la verticale par un fil de laiton β , dont le bout forme crochet et qui passe à frottement dur dans une filière où un ressort le presse.

Quand la combustion de la bougie a amené la flamme jusqu'en β , elle fond le fil, le déclenchement se produit, les deux charbons s'écartent brusquement; l'arc s'éteint, mais il se rallume aussitôt dans la bougie voisine. Enfin si une lampe s'éteint subitement, un mécanisme ferme un circuit secondaire qui remplace la lampe éteinte par une résistance égale, et par suite les autres lampes placées dans le même circuit continuent à fonctionner.

La gouttière de cuivre IIIII qui soutient le circuit directeur est large, mais peu épaisse, pour éviter les ombres. Avec la machine Gramme, dite à quatre lumières, dont la résistance a été réduite de façon à éviter les échauffements intérieurs quand la vitesse atteint 2500 tours, on a pu allumer jusqu'à vingt-quatre foyers avec un moteur de huit chevaux. M. Jamin cite encore les résultats suivants : A la vitesse de 1500 tours, et avec des bougies de 0^m,004 en nombre variant de 1 à 14, la dépense en chevaux et la lumière totale augmentent jusqu'à 9 bougies, puis diminuent toutes deux au-delà. Avec 10 bougies, la dépense serait de 1/2 cheval par bougie. La lumière de chaque foyer diminue avec le nombre des foyers : une seule bougie donne 134 Carcels, 2 se réduisent chacune à 113 et 14 ne valent plus que 50. Enfin, la distance à laquelle on peut conduire la lumière augmente avec la vitesse : à 1500 tours, on peut introduire dans le circuit 1 kilomètre de fil de cuivre de 0^m,001 sans altérer l'éclat; avec 2000 tours, on peut aller jusqu'à 4 kilomètres de ce fil ou 16 kilomètres de 0^m,002.

bon placée dans le vide ou dans un milieu non comburant; tantôt par une baguette de charbon qui brûle à l'air libre en même temps qu'elle s'échauffe. Dans le premier cas, on a les *lampes à incandescence pure*, où la substance n'est pas détruite, parce qu'il n'y a pas combustion; mais elle se désagrège, devient friable et se rompt rapidement; le charbon se désagrège aussi ou se volatilise. La lampe à charbon d'Edison appartient à cette catégorie (1). Dans le second cas, on a les lampes *mixtes*, ou à *contact imparfait*, dans lesquelles le foyer lumineux se forme au contact de deux charbons, en sorte qu'il y a à la fois incandescence due à la résistance du contact et petit arc voltaïque produit par l'atmosphère charbonneuse que la combustion du charbon développe autour du contact. Les lampes de Reynier et de Werdermann appartiennent à cette seconde catégorie.

L'éclairage par incandescence est relativement coûteux; mais les lampes sont assez simples et d'un emploi commode. Elles peuvent être alimentées par des piles ou des machines et conviennent aux travaux de laboratoire et aussi dans certains établissements, car elles se prêtent à la division de la lumière en raison de leur faible résistance.

Lampe d'Edison. — C'est un globe de verre en forme de poire (fig. 334), au bas duquel rentrent deux tubes, par où passent des fils de platine pourvus de crampons à vis pour recevoir le *fer à cheval*. Ce fer à cheval, de 3 centimètres de haut et 1,8 de large, se prépare en carbonisant à l'abri du contact de l'air un morceau de carton mince de la même forme. Dans l'intérieur du globe, on fait un vide très par-

(1) Dans cette première catégorie rentrent aussi les *lampes à charbons encastrés*, comme celle de Lodyguine et Kosloff, consistant en une baguette de charbon verticale comprise entre deux blocs conducteurs, et enfermée dans un globe en verre hermétiquement clos. Le charbon s'use un peu au début, mais la combustion s'arrête dès que l'oxygène du milieu a été brûlé.

fait. Des fils de cuivre établissent la communication entre les fils de platine et les vis d'attache qui sont sur la base en bois de la lampe (1).

Lampe Reynier (1878). — Le principe de cette lampe est le suivant : si une baguette mince de charbon C (fig. 335), pressée latéralement par un contact élastique *l*, et poussée suivant son axe de manière à buter toujours contre un bloc de charbon B, est traversée entre ces deux contacts par un courant, elle devient incandescente dans

la partie *ij* et brûle en s'amincissant vers l'extrémité. La combustion du carbone accroît la chaleur développée par le passage du courant dans la partie

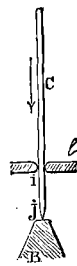


FIG. 335.

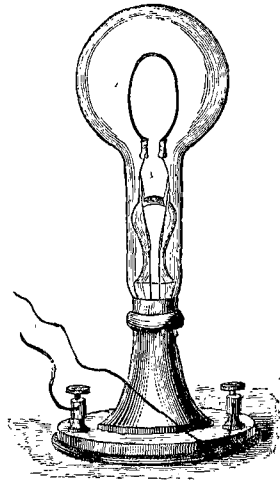


FIG. 334.

ij (2). Le bloc de charbon B formant le contact *en bout* est relié au pôle négatif d'une pile, et le contact *latéral l* avec le pôle positif. M. Reynier a remplacé ensuite le bloc de

(1) Dans la lampe Swan, le charbon provient de la carbonisation de parchemin végétal et est en fil très mince. Pour éliminer l'air qui peut se trouver dans ses pores, on porte le charbon à une très haute température par le courant électrique, pendant qu'on fait le vide dans le globe avec une pompe de Sprengel.

(2) En 1876, M. Varley avait imaginé une lampe dans laquelle une baguette courbe de charbon reposait *mollement* par son poids et celui de sa monture sur la périphérie d'un tronc de cône en charbon de corne : d'où contact imparfait et, par suite, incandescence et combustion de la baguette courbe par son extrémité.

charbon B par un galet de charbon à axe horizontal, sur le bord duquel presse la baguette C, en sorte que la com-

posante tangentielle du poids de celle-ci fait tourner la roue, ce qui enlève les résidus formés par les impuretés du charbon.

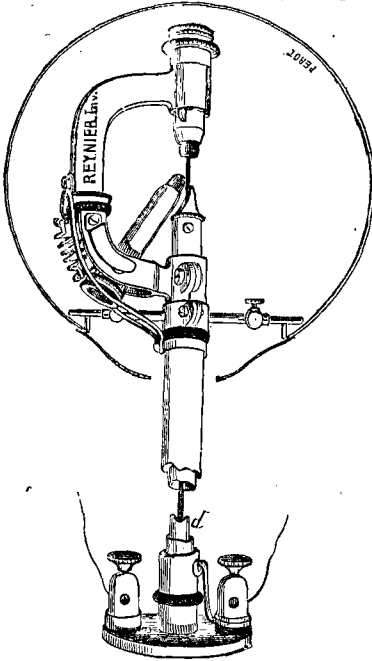


FIG. 336.

La figure 336 représente la dernière disposition de la lampe, destinée à être suspendue.

Le contact en bout est simplement monté dans un porte-contact fixé à bayonnette dans la douille inférieure de l'appareil; le contact latéral est pressé par un ressort, et la baguette est placée dans le tube vertical. L'incandescence de la baguette est

limitée dans la partie comprise entre les deux contacts (1).

(1) ALLUMEUR-SUBSTITUTEUR AUTOMATIQUE REYNIER. — Le diagramme des communications (fig. 337) fait comprendre le fonctionnement de l'appareil. Le conducteur principal CC aboutit à l'allumeur, où il se dérive en deux circuits d'égale résistance : la lampe L et une spirale de maillechort R. Le courant dérivé qui passe par la lampe aimante un électro-aimant dont le levier d'armature coupe la dérivation à travers le maillechort, et rétablit automatiquement cette dérivation, quand le courant ne passe plus à travers l'électro-aimant.

La figure 338 représente l'allumeur : CC sont les fils de ligne; LL, les conducteurs aboutissant à la lampe; RR, les attaches de la résistance.

La figure 339 montre trois foyers L, L', L'', assemblés en série et respecti-

La lumière varie avec l'intensité du courant. Avec 12 éléments Bunsen, elle atteint 15 à 20 becs Carcel.

vément commandés par les allumeurs M, M', M''. Chacune des trois lampes

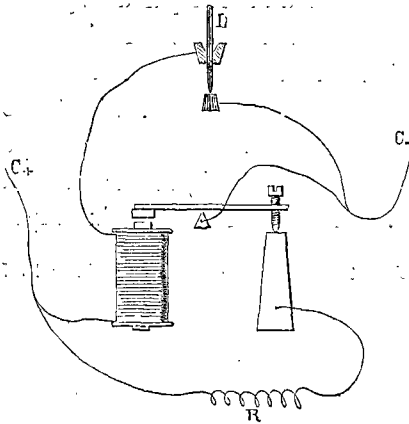


FIG. 337.

est individuellement doublée par une résistance (ou une seconde lampe)

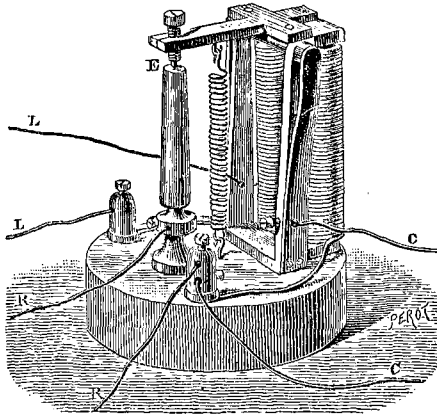


FIG. 338.

L₁, L₁', L₁''. Avec cette disposition l'appareil répond à tous les cas d'allu-

Lampe Werdermann. — Elle offre une grande analogie avec la précédente; mais la disposition est renversée. L'électrode positive est une baguette verticale de charbon, guidée et sollicitée à monter par un système de contre-poids. Elle vient buter contre un disque de charbon à grande section qui forme l'électrode négative. Un ressort assure la permanence du contact. L'électrode négative ne s'échauffe pas sensiblement et la baguette positive rougit sur une certaine longueur réglée par un contact latéral. A l'origine, M. Werdermann montait dix lampes (1) en dérivation, d'extinction et de réallumage voulus ou accidentels. Les lampes dev-

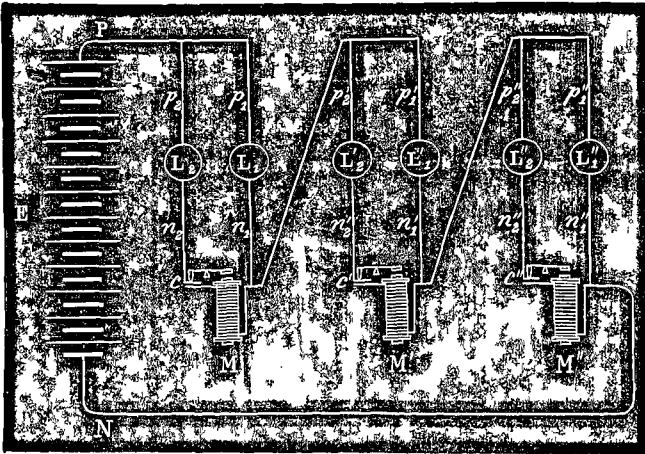


Fig. 330.

nues indépendantes les unes des autres, l'extinction d'un foyer ne peut amener une extinction générale.

(1) Dans le dernier modèle (fig. 340 et 341), l'auteur rend la pression du contact *latéral* sur la tige de charbon dépendante de celle que cette tige exerce sur le disque de charbon. A cet effet, le disque est porté par un fléau et équilibré par un contre-poids susceptible d'être déplacé horizontalement. Un petit bras, placé à l'intérieur du globe de verre et attaché au porte-disque, vient appuyer contre une surface isolée fixée à la partie mobile du contact

vation sur le circuit d'une machine Gramme à faible résistance. Le montage en tension est préféré aujourd'hui.

latéral, et exerce ainsi contre la tige de charbon une pression d'autant plus forte que la pointe du charbon ascendant tend davantage à soulever le disque supérieur. Cette pression latérale ralentit le mouvement ascensionnel de la

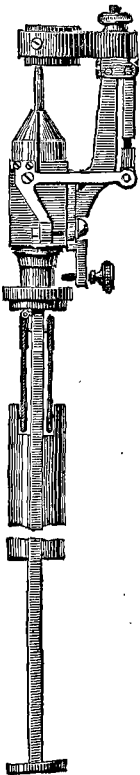


FIG. 340.

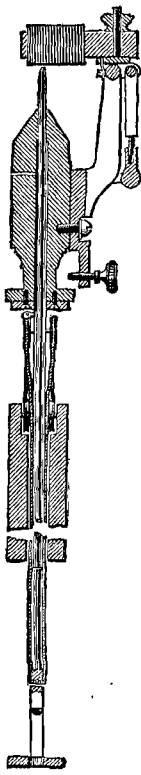
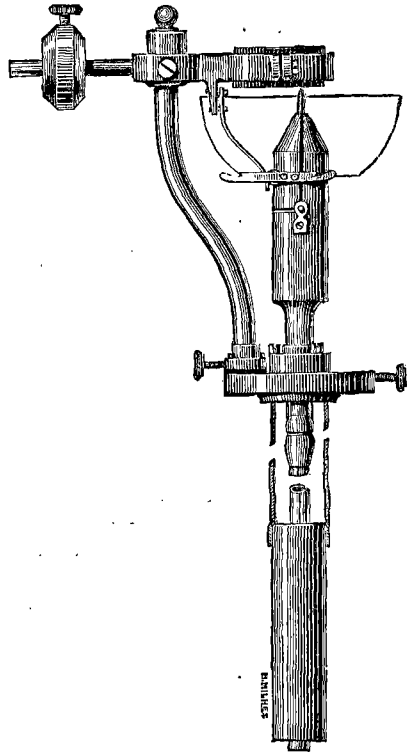


FIG. 341.



tige; si la pression sur le disque diminue par l'usure du charbon, le contact latéral se desserre, et le mouvement ascendant reprend. Le même bras permet de supprimer la lampe du circuit si elle s'éteint; à cet effet, quand la tige de charbon ne soutient plus le disque, le bras bute de dedans en dehors contre un arrêt métallique qui établit une communication directe entre les bornes d'entrée et de sortie du courant, et met ainsi la lampe hors du circuit.

NOTES.

Charbons à lumière. — Davy, qui le premier (1802) obtint l'arc voltaïque, se servait de baguettes de charbon de bois éteint dans l'eau ou le mercure : elles s'usaient très rapidement. Foucault remplaça le charbon de bois par le charbon des cornues à gaz, qui est plus dense et résiste mieux. On a cherché depuis à purifier le charbon des cornues ou à le remplacer par des agglomérés. M. Archereau a employé un mélange de charbon et de magnésie que l'on comprime. Dans le système Gauduin, on moule à la presse hydraulique des charbons provenant de la décomposition en vase clos de goudrons, bitumes, etc. Enfin, M. Carré incorpore dans les charbons certains sels métalliques pour obtenir une lumière plus fixe ou mieux colorée : ses charbons artificiels sont formés d'un mélange de charbon en poudre, coke et noir de fumée, que l'on agglomère avec un sirop formé de sucre et de gomme, et que l'on passe à la filière sous forte pression. Les baguettes obtenues sont, à plusieurs reprises, cuites, trempées dans le sirop, recuites, etc. On a ainsi des crayons bons conducteurs de toutes longueurs et de diamètres variables de 1 à 20 millimètres. Les charbons pour lampes à incandescence ont 2 à 3 millimètres, en général ; ceux pour les bougies Jablochkoëff et Jamin, 4 millimètres ; pour les régulateurs ordinaires, on prend des charbons de 7 à 10 millimètres, et, pour les phares, des charbons allant jusqu'à 20 millimètres.

Unité de lumière. — En France, l'unité de lumière est le *bec Carcel* (mèche de 3 millimètres, brûlant 42 grammes d'huile de colza épurée à l'heure avec une hauteur de flamme de 40 millimètres). En Angleterre, c'est une bougie de spermaceti (Candle) de six à la livre. Un bec Carcel vaut 7,4 ou 9,5 bougies anglaises suivant les auteurs.

Dans les mesures photométriques, il faut tenir compte de ce que l'intensité lumineuse n'est pas la même dans toutes les directions : ainsi, dans les régulateurs, le maximum d'intensité a lieu dans une direction inclinée de 60 degrés sur le plan horizontal. Il est plus exact de comparer les éclairagements produits dans les mêmes conditions sur une aire déterminée du plancher.

Résultats pratiques. — Suivant que la machine doit alimenter un seul foyer ou plusieurs foyers dans le même circuit, il convient de lui donner une faible résistance intérieure ou une grande force électromotrice. Pour une seule lumière, le fil des bobines induites doit être gros et court, et on emploie souvent un ruban de cuivre au lieu de

fil. La machine dynamo à courant continu de Siemens, pour un seul foyer, n'a qu'une résistance intérieure de 0,7 à 0,75 Ohm ; celle de Gramme, avec une résistance de 1 Ohm, donne un bel arc voltaïque de 5 millimètres dans un régulateur Serrin ; avec une vitesse suffisante, la machine type d'atelier entretient deux foyers. La machine de Brush semble être jusqu'ici celle qui donne la plus grande force électro-motrice, savoir 839 Volts : sa résistance intérieure est de 10,55 Ohms. Elle alimente 16 lampes disposées en série dans le même circuit : la résistance extérieure étant alors 72,96 Ohms, l'intensité du courant est de 10,04 Webers.

La résistance de l'arc voltaïque diminue avec l'intensité du courant : d'après M. Preece, pour un courant de 10 Webers, donnant une intensité lumineuse de 440 bougies anglaises, la résistance de l'arc serait de 2,77 Ohms ; pour un courant de 21,5 Webers et une lumière de 900 bougies, elle serait de 1,07 Ohm ; et enfin, pour un courant de 30,12 Webers et une lumière de 1230 bougies, elle serait de 0,54 Ohm. La lumière ne croîtrait proportionnellement au carré du courant qu'avec l'incandescence seulement ; avec l'arc, elle serait à peu près proportionnelle au courant.

Une machine Gramme à courant continu, type d'atelier, dépensant 3 chevaux, alimente soit dix lampes Reynier à incandescence, disposées en série, et donnant chacune une lumière de 10 becs Carcel, soit un régulateur Serrin de plus de 300 becs Carcel. On a construit des machines Gramme à courants alternatifs de toutes les dimensions, depuis celle à 4 lumières, jusqu'à celles alimentant 4 circuits de 5 bougies électriques. On compte en général 1 cheval-vapeur ou $1\frac{1}{4}$ (20 chevaux pour 16 foyers) par bougie de 50 becs Carcel. L'hippodrome de Paris possède même une machine Gramme alimentant 60 bougies disposées en 12 circuits, et qui n'absorberait que 50 chevaux. Sa vitesse est de 600 tours par minute, l'excitatrice en fait 1000.

Quand la distance du foyer à la source augmente, l'intensité diminue par l'accroissement de résistance du circuit. La section du conducteur employé doit donc augmenter en proportion de la longueur : ainsi 100 mètres de fil de cuivre de 3 millimètres de diamètre, et dont la conductibilité serait environ 95 pour 100 de celle du cuivre pur, ont une résistance de 0,24 Ohm ; 200 mètres de fil de 4, une résistance de 0,26, et 300 mètres de fil de 5 une résistance de 0,25.

Éclairage des villes. — Dans le projet attribué à M. Edison, l'un des pôles du générateur d'électricité est relié à la ligne électrique ou conducteur principal placé dans les rues, et l'autre pôle aux conduites de gaz. Sur le conducteur principal sont embranchées des dérivations conduisant l'électricité dans les maisons, d'où elle revient au géné-

rateur par les tuyaux de gaz. Les courants dérivés ainsi formés peuvent être employés à rendre incandescent un métal peu fusible, comme l'iridium ou un de ses alliages.

Éclairage des salles. — Pour avoir une lumière fixe, homogène et sans ombres, un des meilleurs moyens consiste à placer les régulateurs de telle sorte que d'aucun point de la salle on n'aperçoive directement le point lumineux. La lumière est projetée par des réflecteurs sur le plafond et les murs peints en blanc, qui la réfléchissent et la diffusent. Quand on veut éclairer spécialement certains points, on la projette sur des miroirs, en faisceaux parallèles, à l'aide de lentilles.

Division de la lumière. — Quand on introduit plusieurs foyers dans le même circuit, toutes choses égales d'ailleurs, la somme des intensités lumineuses est plus faible que l'intensité d'un foyer unique et par suite la division de la lumière devient de moins en moins économique à mesure qu'on multiplie le nombre des foyers. Cela tient à deux causes : 1° toute la lumière produite par un foyer n'est pas utilisée pour l'éclairage, une partie est masquée par les charbons, les supports, etc., et cette cause se multiplie avec le nombre des ampes ; 2° dans chaque arc voltaïque, il se manifeste une sorte de polarisation des électrodes, c'est-à-dire une force électro-motrice opposée à celle de la source. Si on dispose les lampes dans des circuits parallèles, et non pas en série, ces forces de polarisation ne s'ajoutent plus les unes aux autres ; mais alors la variation de résistance d'un arc exerce sur les autres foyers une influence bien plus grande que lorsqu'ils sont disposés en série.

Expériences de M. Joubert. — Dans ses expériences avec la machine Siemens à courants alternatifs (v. p. 404), M. Joubert a obtenu les résultats suivants : Pour faire brûler une bougie Jablochhoff dans les conditions normales (charbons de 0^m,004 et intensité lumineuse de 50 becs Carcel), il faut un courant dont l'intensité moyenne soit de 8 à 9 Webers ; la bougie s'éteint quand l'intensité tombe au-dessous de 5 Webers ; les charbons rougissent sur toute la longueur quand elle atteint 11 Webers. La chute moyenne de potentiel entre les deux charbons est de 40 à 45 Volts. Le travail absorbé par une bougie normale serait d'environ $\frac{8 \times 40}{9,8}$ ou 32 kilogrammètres par seconde. La différence de potentiel de 40 à 45 Volts, mesurée à la base des charbons, se manifeste dès que le courant commence à passer et reste à peu près constante, malgré les variations d'intensité. Or, la résistance de l'arc est très faible et diminue quand la température augmente : il y a donc une force électro-motrice que l'auteur évalue à 30 Volts, se produisant entre les charbons comme entre les élec-

trodes d'un voltamètre et à peu près indépendante de l'intensité. En vertu de cette polarisation des charbons, il s'établit tout d'abord une chute fixe de potentiel, et, à partir de ce moment, le travail produit est proportionnel à la quantité d'électricité qui passe.

Si l'arc est produit dans un champ magnétique soumis aux mêmes variations que le courant, et dont la direction soit normale au plan des charbons, comme celui produit par le cadre directeur dans la bougie Jamin, la chute du potentiel entre les charbons est plus grande que dans le cas ordinaire et croît avec l'intensité du champ.

Chaleur de l'arc voltaïque. — C'est à tort que l'on dit quelquefois que la lumière électrique est une lumière sans chaleur. Les radiations obscures ou calorifiques représentent, suivant M. Tyndall, 90 pour 100 de l'émission d'une brillante lumière électrique, comme on peut s'en assurer en absorbant les radiations lumineuses par une dissolution d'iode dans du sulfure de carbone (1). La chaleur de l'arc voltaïque est utilisée pour volatiliser les métaux, et M. Siemens a réussi à fondre l'acier dans un creuset disposé au foyer d'une sorte de lampe différentielle de son système traversée par un courant de 70 webers.

« A lumière égale, dit M. Tyndall (2), l'arc voltaïque transmet à
 » l'air ambiant beaucoup moins de chaleur que la flamme du gaz, à
 » cause du plus petit volume du foyer et de la quantité plus faible de
 » combustion dans un temps donné, et aussi parce que l'air ne peut
 » se mêler intimement aux charbons comme à la flamme. L'azote de
 » l'air, absorbant et diffusant la chaleur sans aider à la combustion,
 » abaisse la température de la flamme, en sorte qu'il faut brûler une
 » plus grande quantité de gaz pour produire la lumière nécessaire.
 » Si paradoxal que cela puisse paraître, c'est à cause de son énorme
 » température réelle que la lumière électrique paraît si froide :
 » car c'est elle qui rend le rapport de la chaleur lumineuse à la
 » chaleur obscure plus grand dans la lumière électrique que dans
 » les flammes les plus brillantes. En outre, la lumière électrique n'a
 » pas besoin d'air pour l'entretenir : elle luit dans le vide. Sa cha-
 » leur et son éclat ne sont donc pas achetés aux dépens du fluide

(1) L'intensité de la lumière dépend de la température du foyer. Tous les corps solides commencent à émettre de la lumière vers 1000 degrés, l'intensité lumineuse augmente ensuite plus rapidement que la température. Au-dessus de 2000 degrés, on a la lumière blanche. Le rapport des rayons visibles aux rayons invisibles serait de 1 à 24 pour la lumière du gaz, 1 à 23 pour un fil de platine incandescent et 1 à 9 pour l'arc voltaïque. Pour un même courant, l'arc donnerait deux fois et demie plus de lumière qu'un fil incandescent.

(2) Tyndall, *La lumière électrique*, Conférence à l'Institution royale.

» vital de l'atmosphère ; elle répand sa clarté sans vicier l'air. » La lumière électrique n'a pas d'odeur et elle conserve aux couleurs leurs nuances.

Horticulture électrique. — M. William Siemens a étudié l'influence de la lumière électrique sur la végétation. Il a reconnu que la lumière électrique est efficace pour produire de la chlorophylle dans les feuilles des plantes et avancer leur croissance. Les plantes peuvent pousser avec vigueur en les exposant pendant le jour à la lumière du soleil et pendant la nuit à la lumière électrique. Les frais de l'horticulture électrique peuvent être très modérés quand on peut utiliser des sources naturelles d'énergie, comme les chutes d'eau.

Les figures 330 et 331 sont empruntées à *l'Éclairage par l'électricité*, de M. Fontaine; les figures 332, 333, 340 et 341, au journal *la Lumière électrique*.

IIAPITRE XLII

RELATIONS ENTRE L'ÉLECTRICITÉ ET LA CHALEUR

EFFET CALORIFIQUE DU COURANT ÉLECTRIQUE

Les courants échauffent les fils qu'ils traversent. L'effet calorifique d'un courant est proportionnel à : 1° la résistance du conducteur ; 2° le carré de l'intensité du courant ; 3° le temps pendant lequel passe le courant.

La quantité totale de travail mécanique développée par un courant C , en passant à travers une résistance R , dans le temps t , est RC^2t .

La quantité de chaleur équivalente s'obtient en divisant la quantité précédente par J , l'équivalent mécanique de la chaleur (1); et on a, si tout le courant est converti en une quantité de chaleur H (2),

$$H = \frac{RC^2t}{J}$$

THERMO-ÉLECTRICITÉ

Quand deux métaux sont soudés ensemble de façon à former un circuit fermé (fig. 342), si une des jonctions est plus échauffée que l'autre, il se manifeste dans le circuit

(1) Voir Tyndall, *Heat a mode of motion* (Longmans), 4^e éd., p. 72, art. 84.

(2) L'échauffement d'une portion r d'un circuit de résistance totale R , E étant la force électro-motrice totale, est exprimé par $H = \frac{C^2rt}{J} = \frac{E^2rt}{JR^2}$.

H étant proportionnel à r , les parties du circuit les plus résistantes s'échaufferont le plus. (Voy. vol. I, p. 521).

J. R.

un courant électrique dont la direction et l'intensité dépendent de la nature des métaux, de la différence des températures des deux soudures et de la moyenne de ces températures. Ce phénomène a été découvert par Seebeck.

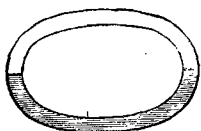


FIG. 342.

Pour une température et une différence de température données, le sens du courant et la force électro-motrice qui lui donne naissance varient avec la nature des métaux formant le couple d'après la loi suivante, due à Becquerel :

Considérons trois métaux ABC tels que, si A et B sont soudés ensemble, le courant traverse la soudure échauffée de A vers B, et tels aussi que si B et C sont soudés ensemble, le courant traverse la soudure échauffée de B vers C. L'expérience prouve que si A et C sont soudés ensemble, le courant traverse la soudure échauffée de A vers C et sa force électro-motrice est la somme algébrique des forces électro-motrices entre AB et BC (1).

(1) C'est la conséquence de ce principe dû à Volta et énoncé au chap. XLIII que, si trois métaux A, B, C, forment un circuit fermé à une température uniforme t , il ne se produit aucun courant. Alors la force électro-motrice $(CA)_t$ due au contact CA est égale et de signe contraire à la somme des forces $(AB)_t$ et $(BC)_t$ des contacts AB et BC. Mais la force $(AC)_t$ du contact AC est égale et de signe contraire à celle du contact CA ou à $(CA)_t$. Donc, on a :

$$(AC)_t = (AB)_t + (BC)_t.$$

Pour une autre température t' , on a :

$$(AC)_{t'} = (AB)_{t'} + (BC)_{t'},$$

d'où

$$(AC)_t - (AC)_{t'} = (AB)_t - (AB)_{t'} + (BC)_t - (BC)_{t'},$$

et par suite $F_{AC} = F_{AB} + F_{BC}$, en représentant par F_{AC} , F_{AB} et F_{BC} les forces produites par la différence de température $t - t'$ des soudures AC, AB et BC.

ÉCHELLE THERMO-ÉLECTRIQUE

On a pu construire une échelle thermo-électrique, c'est-à-dire une liste de métaux disposés dans un ordre tel que, si on soude deux d'entre eux, le courant traverse la soudure échauffée en allant du métal placé le plus haut dans la liste vers le métal placé plus bas, et que la force électromotrice du courant correspondant à deux métaux est toujours plus grande que celle qui correspond à deux autres métaux occupant sur la liste des positions intermédiaires entre celles des deux premiers.

L'échelle thermo-électrique donnée par Becquerel (1) est la suivante :

Bismuth.	Or.
Platine.	Argent.
Plomb.	Zinc.
Étain.	Fer.
Cuivre.	Antimoine.

La force électro-motrice la plus grande doit être fournie par le complet bismuth-antimoine : ce sont en effet les deux métaux employés pour la construction des *piles thermo-électriques*.

PILE THERMO-ÉLECTRIQUE

Avec un seul barreau de chaque métal, on n'obtient qu'un courant faible.

Quand on veut un courant plus fort, on peut combiner les effets d'un certain nombre de couples séparés.

Ainsi, si les barreaux ombrés de la figure 343 représentent l'antimoine, et les barreaux unis le bismuth, on voit

(1) *Ann. de chimie*, 2^e série, t. XLI, p. 353.

qu'en chauffant toutes les soudures d'un même côté, on obtiendra, dans un conducteur reliant les pôles, la somme de tous les courants produits respectivement dans chaque couple.

C'est la disposition adoptée dans la pile thermo-électrique, qui contient souvent plusieurs centaines de couples, et qui, avec un galvanomètre sensible, constitue le thermomètre le plus délicat que l'on connaisse.

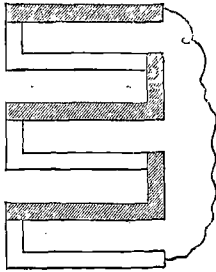


FIG. 343.

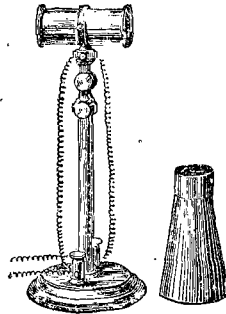


FIG. 344.

La figure 344 représente la forme usuelle de cette pile. On peut placer à l'une de ses extrémités un réflecteur conique, qui concentre la chaleur sur la face de la pile.

Les courants thermo-électriques ont une force électromotrice très faible : les galvanomètres employés à leur mesure doivent donc être à fil gros et court.

INVERSION DU COURANT

Cumming a découvert, en 1823, que si on élevait au-dessus d'un certain degré la température d'une soudure dans certains circuits thermo-électriques, le courant qui traverse la soudure changeait de sens.

Dans un circuit cuivre et fer, dont l'une des soudures est maintenue à la température ordinaire et l'autre chauffée

progressivement, le courant va du cuivre au fer à travers la soudure chaude et la force électro-motrice continue à croître jusqu'à ce que la soudure chaude ait atteint la température de 284° C. environ. Si on élève la température au-dessus de ce point, la force électro-motrice décroît d'abord, devient nulle et finalement change de sens.

La température de la soudure échauffée qui correspond au changement de sens du courant dépend naturellement de celle de l'autre soudure : la température T du maximum constitue ce qu'on appelle le point *neutre*. Pour le fer et le cuivre, comme on vient de le voir, le point neutre T est d'environ 284° C.

L'inversion du courant s'obtient plus aisément en chauffant la soudure la plus froide. Quand la température des deux soudures dépasse T, le courant va du fer au cuivre à travers la soudure la plus chaude, c'est-à-dire qu'il a, par rapport à la soudure la plus chaude, une direction inverse de celle qu'il a quand la température des deux soudures est inférieure à T. En d'autres termes, si une des soudures est à la température neutre T, et que l'autre soit plus chaude ou plus froide, le courant va toujours du cuivre au fer à travers la soudure qui est à la température neutre (1).

FORCE ÉLECTRO-MOTRICE

Le professeur Tait a fait des recherches sur la force électro-motrice de circuits thermo-électriques de différents métaux et à différentes températures. Il trouve que la force électro-motrice d'un circuit peut être très exactement exprimée par la formule :

$$E = a (t_1 - t_2) \left[t_0 - \frac{1}{2} (t_1 + t_2) \right]$$

(1) *Electricity*, de Maxwell, 252, vol. I, p. 304.

où t_1 est la température absolue (1) de la soudure chaude, t_2 celle de la soudure froide, et t_0 celle à laquelle les deux métaux sont neutres l'un par rapport à l'autre. α est un coefficient qui dépend de la nature des métaux (2).

PHÉNOMÈNE DE PELTIER

Peltier a découvert que l'effet thermo-électrique est « réversible », c'est-à-dire que, lorsqu'un courant passe à travers la soudure de deux métaux, la soudure est échauffée quand le courant a un certain sens, et refroidie quand il passe dans le sens contraire (3).

On doit se rappeler qu'un courant échauffe toujours tout conducteur dans lequel il passe. Le fait que l'échauffement dû à la résistance ordinaire est indépendant du sens du courant, tandis que celui dû à l'effet de Peltier en dépend, permet de mesurer ce dernier; car, dans un cas, la chaleur du circuit sera celle due à la résistance, plus l'effet

(1) Pour l'explication de ce que l'on entend par « température absolue », voy. la *Theory of Heat*, de Maxwell (Longmans), 4^e éd., p. 159.

[C'est la température comptée à partir de 273° C. au-dessous de la glace fondante, et mesurée par le thermomètre à air. Comme il n'entre dans la formule que des différences de température, le mot *absolu* doit signifier simplement que la température doit être mesurée par le thermomètre à air.]

(2) *Electricity*, de Maxwell, 254, vol. I, p. 305.

(3) La soudure se refroidit si le courant a la même direction que le courant thermo-électrique qu'on obtiendrait en chauffant cette soudure, et s'échauffe s'il a la direction contraire. Il en résulte que, dans un circuit thermo-électrique, le courant thermo-électrique tend à refroidir la soudure chaude et à réchauffer la soudure froide : d'où la nécessité de fournir de la chaleur à la soudure chaude, et d'absorber par un réfrigérant extérieur la chaleur communiquée à la soudure froide. Tout cela est conforme au principe de la conservation de l'énergie; toutefois pour mettre le phénomène d'inversion du courant d'accord avec ce principe, il faut admettre un autre phénomène que M. Thomson a découvert par des considérations théoriques, puis vérifié expérimentalement, et qu'il appelle le *transport électrique de la chaleur*. (Voy. Maxwell, *Electricity*, vol. I, art. 252 et 253, ou Jenkin, *Electricity*, pp. 185 et 186.) I. R.

d'échauffement du phénomène de Peltier ; et, dans l'autre cas, celle due à la résistance moins l'effet de refroidissement de ce phénomène. Le refroidissement dû à l'effet de Peltier sera donc la demi-différence des effets calorifiques des courants dans les deux sens.

La chaleur totale absorbée à la soudure des deux métaux traversée par un courant C pendant le temps t est $\pi C t$, π étant le coefficient de l'effet de Peltier pour les métaux donnés, c'est-à-dire la quantité de chaleur absorbée par la soudure, quand le courant a l'unité d'intensité et passe pendant l'unité de temps. La chaleur absorbée est en effet proportionnelle à l'intensité du courant et au temps pendant lequel il passe. La chaleur *engendrée* à la soudure peut donc s'écrire — $\pi C t$, car la chaleur absorbée peut être regardée comme de la chaleur engendrée négative.

L'effet calorifique dû à la résistance est, d'après la page 437, $\frac{R}{J} C^2 t$. La chaleur totale engendrée dans le circuit composé est donc

$$H_1 = \frac{R}{J} C^2 t - \pi C t \quad (1),$$

c'est-à-dire qu'avec le courant dans le sens qui refroidit la soudure, l'effet calorifique total est plus petit que celui dû simplement à la résistance.

Renversons le sens du courant. On sait par l'expérience que l'effet calorifique total sera maintenant plus grand que celui dû seulement à la résistance. Dans l'équation, ce changement de sens du courant s'exprime en changeant le signe de C , c'est-à-dire en mettant — C à la place de C , et nous avons

$$H_2 = \frac{R}{J} (-C)^2 t - \pi (-C) t,$$

(1) *Electricity*, de Maxwell, 249, vol. I, p. 300.

mais $(-C)^2 = C^2$; le changement de sens du courant ne change donc pas le premier terme, tandis qu'il change le signe du second, et nous avons

$$H_2 = \frac{R}{J} C^2 t + \pi C t.$$

L'effet total de Peltier est alors $\frac{1}{2} (H_2 - H_1)$, et l'unité d'effet de Peltier pour ces métaux est

$$\pi = \frac{1}{2} \frac{H_2 - H_1}{C t}.$$

Afin de déterminer expérimentalement l'unité d'effet de Peltier (π) pour deux métaux donnés, il faut les souder ensemble et mesurer les quantités de chaleur produites en faisant passer un courant d'intensité connue, pendant un temps connu, d'abord dans un sens, puis dans l'autre sens; puis diviser la demi-différence de ces deux quantités par le produit du courant par le temps.

Les quantités de chaleur peuvent être mesurées en plongeant la soudure dans une quantité connue d'un liquide dont on connaît la chaleur spécifique, et notant l'accroissement de température. Remarquons qu'il n'est pas nécessaire de connaître la résistance des fils.

PYRO-ÉLECTRICITÉ

Quand on chauffe un cristal de tourmaline, on observe que ses deux extrémités prennent des électricités contraires. Ce phénomène, connu sous le nom de « pyro-électricité » a été étudié par M. Gaugain (1).

M. Gaugain a montré qu'un cristal de tourmaline, quand on le chauffe, peut être considéré comme un élément vol-

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 3^e série, t. LVII, p. 5, et Mascart, *Électricité statique*, t. II, p. 497.

taïque de très grande force électro-motrice et de très grande résistance intérieure. Il suffit de relier par un fil conducteur les deux bouts d'un cristal, pour obtenir un courant d'électricité quand on chauffe le cristal.

La force électro-motrice de différentes parties du même cristal est proportionnelle à la longueur, et les courants produits varient avec la section transversale moyenne, c'est-à-dire en raison inverse de la résistance.

En 1759 (1), Bergmann a prouvé que les quantités totales d'électricité (+) et (—) développées étaient toujours égales, car leur somme algébrique est zéro. Il le prouvait en plaçant un cristal de tourmaline dans de l'eau chaude que contenait un vase métallique isolé relié à un électroscope. Celui-ci ne déviait pas.

La polarité de la tourmaline ne dépend pas de la température, mais de sa variation. Quand on chauffe une tourmaline AB, on trouve qu'un bout, A, est (+) et que l'autre, B, est (—). Déchargeons ensuite le cristal, en touchant ses bouts avec les doigts : il ne sera plus électrisé. Si on le laisse alors refroidir et revenir à sa température initiale, le bout B deviendra (+) et le bout A deviendra (—).

NOTES

POUVOIRS THERMO-ÉLECTRIQUES (2).

La force électro-motrice d'un circuit thermo-électrique s'appelle la force *thermo-électrique*. Le *pouvoir thermo-électrique* de deux

(1) *Phil. trans.*, 1759, p. 403.

(2) Voy. *Electricity*, de Jenkin, p. 174, etc., et *Units and Physical Constants*, du docteur Everett, p. 150, etc., d'où les tables et exemples sont tirés.

métaux est la grandeur de la force thermo-électrique, pour une différence de température de un degré centigrade entre les soudures. Ce pouvoir varie avec la température moyenne t des soudures.

Appelant AC et BC les pouvoirs thermo-électriques des couples AC et BC, on a vu (p. 438, note 1) que $AC = AB + BC$. Il en résulte que $AB = AC - BC$, c'est-à-dire que le pouvoir thermo-électrique d'un couple AB est égal à la différence des pouvoirs thermo-électriques des couples AC et BC formés respectivement par l'un des métaux et un troisième métal C, pris pour étalon. C'est le *plomb* qui est pris ordinairement pour étalon.

La table suivante donne, en unités magnétiques C. G. S., le pouvoir thermo-électrique d'un couple dont le plomb forme un des éléments : en divisant les valeurs données par 100, on a la force en micro-volts. Elle résulte d'expériences de Matthiessen, et convient à une température moyenne de 20° C.

TABLE EN UNITÉS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES C. G. S. DES POUVOIRS THERMO-ÉLECTRIQUES, LE PLOMB ÉTANT UN DES ÉLÉMENTS DU COUPLE

Bismuth du commerce, en fil.	+ 9700	Argent pur.	— 300
— pur, en fil.	+ 8900	Zinc pur.	— 370
— cristallisé, direction		Cuivre, précipité par galvano-	
de l'axe.	+ 6500	plastie.	— 380
— cristallisé, direction		Antimoine, du commerce, en	
normale à l'axe.	+ 4500	fil.	— 600
Cobalt.	+ 2200	Arsenic.	— 1356
Argent allemand.	+ 1175	Fer, fil de piano.	— 1750
Mercure.	+ 41,8	Antimoine cristallisé, direc-	
Plomb.	0	tion de l'axe.	— 2260
Étain.	— 10	Antimoine cristallisé, direc-	
Cuivre, du commerce.	— 10	tion normale à l'axe.	— 2640
Platine.	— 90	Phosphore rouge.	— 2970
Or.	— 120	Tellure.	— 50200
Antimoine pur en fil.	— 280	Sélénium.	— 80700

La table suivante est tirée du diagramme thermo-électrique de Tait (*Trans. Roy. Soc. Edinburgh*, vol. XXVII, déc. 1873), en supposant la force électro-motrice de l'élément Grove égale à $1,97 \times 10^8$ unités C. G. S. Elle est aussi rapportée au plomb et t est la température moyenne en degrés centigrades.

TABLE DES POUVOIRS THERMO-ÉLECTRIQUES RAPPORTÉS AU PLOMB.

Fer.....	— 1734 + 4,87 <i>t</i>	Magnésium.....	— 224 + 0,95 <i>t</i>
Acier.....	— 1139 + 3,23 <i>t</i>	Argent allemand	
Alliage, platine-iri-		(mailechort)....	+ 1207 + 5,12 <i>t</i>
dium (?).....	— 839 à toute temp.	Cadmium.....	— 266 — 4,29 <i>t</i>
Alliage, platine, 95;		Zinc.....	— 234 — 2,40 <i>t</i>
iridium, 5.....	— 622 + 0,55 <i>t</i>	Argent.....	— 214 — 1,50 <i>t</i>
Alliage, platine, 90;		Or.....	— 283 — 1,02 <i>t</i>
iridium, 10.....	— 596 + 1,34 <i>t</i>	Cuivre.....	— 136 — 0,95 <i>t</i>
Alliage, platine, 85;		Plomb.....	0
iridium, 15.....	— 709 + 0,63 <i>t</i>	Étain.....	+ 43 — 0,55 <i>t</i>
Alliage, platine, 85;		Aluminium.....	+ 77 — 0,39 <i>t</i>
iridium, 15.....	— 577 à toute temp	Palladium.....	+ 625 + 3,59 <i>t</i>
Platine malléable ...	+ 61 + 1,10 <i>t</i>	Nickel jusqu'à 175° C.	+ 2204 + 5,12 <i>t</i>
Alliage, platine et		— de 250 à 310° C.	+ 8449 — 24,1 <i>t</i>
nickel.....	— 544 + 1,10 <i>t</i>	— au-dessus de	
Platine écroui.....	— 260 + 0,75 <i>t</i>	340° C.....	+ 307 + 5,12 <i>t</i>

Dans cette table, la limite inférieure de température est pour tous les métaux de -18°C ; la limite supérieure 416°C , sauf les exceptions suivantes : Cadmium, 258°C ; zinc, 373°C ; argent allemand, 175°C .

La différence des pouvoirs thermo-électriques de deux métaux pour une température donnée t fait connaître le pouvoir thermo-électrique du couple formé par ces deux métaux, quand la température moyenne des soudures est t . Le courant va du métal qui a le pouvoir le plus fort à celui qui a le pouvoir le plus faible, à travers la soudure la plus chaude.

Exemples : Pour trouver la force électro-motrice du couple cuivre-fer, les soudures étant aux températures 0°C et 100°C , on a

$$\begin{aligned} &\text{pour le cuivre} && - 136 - 0,95 t \\ &\quad \text{— fer} && - 1734 + 4,87 t \\ \text{d'où pour le cuivre-fer} && = & 1598 - 5,82 t \end{aligned}$$

La température moyenne t étant 50, le pouvoir thermo-électrique, ou force électro-motrice par degré, est $1598 - 5,82 \times 50 = 1307$ unités électro-magnétiques, et la force du couple est $1307 (100 - 0) = 130700$.

D'après la table de Tait, le pouvoir thermo-électrique du couple argent allemand-fer est de $2941 + 0,25 t$, ce qui donne pour $t = 100^{\circ}$, 2966. Kohlrausch a trouvé 24×10^5 unités millimètre-mil-

ligramme-seconde. Les dimensions de la force électro-motrice étant $M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}$, la valeur de l'unité de Kohlrausch dans le système C. G. S. est $10^{-\frac{3}{2}} \times 10^{-\frac{3}{2}} = 10^{-3}$, et par suite le nombre de Kohlrausch est 2400.

POINT NEUTRE.

Le *point neutre* de deux métaux est la température pour laquelle leurs pouvoirs thermo-électriques sont égaux. Le point neutre du couple cuivre et fer sera donné par la relation

$$\text{Cuivre-fer} = 1598 - 5,82 t = 0$$

d'où $t = 275^{\circ}$ C. Quand la température moyenne des soudures est au-dessous de ce point, le courant va du cuivre au fer à travers la soudure la plus chaude. Il cesse quand cette moyenne atteint la température neutre, et change de sens quand elle la dépasse, ainsi que l'indique la formule de Tait, page 441.

CHAÎNE THERMO-ÉLECTRIQUE.

Lorsque deux métaux sont réunis par un troisième métal de façon à former un circuit, la force électro-motrice est la même que si les deux premiers métaux étaient réunis directement, pourvu que les deux soudures avec le troisième métal soient à la même température; ainsi, dans la figure 343, où les deux métaux antimoine et bismuth sont reliés par un fil de cuivre, la force thermo-électrique est la même que si le fil de cuivre était supprimé et les barreaux extrêmes soudés ensemble. On peut remplacer le fil de cuivre par une chaîne de métaux plus complexe, sans changer la force électro-motrice du circuit, pourvu que toutes les jonctions, sauf celle des deux métaux considérés, soient à la même température. Il en résulte que l'on peut expérimenter un couple thermo-électrique, bismuth-antimoine, par exemple, en observant le courant qui passe à travers un circuit complexe, composé, par exemple, du fil de cuivre d'un galvanomètre, muni de bornes de laiton, et de bobines de résistance en argent allemand. On doit cependant, dans ce cas, vérifier l'égalité de température des autres soudures, en constatant qu'il n'y a pas de courant produit quand on supprime le couple thermo-électrique, et qu'on compose un circuit fermé de toutes les autres parties de la chaîne.

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES.

On peut construire des piles thermo-électriques d'une résistance intérieure extrêmement faible, en sorte que, dans les circuits où les autres résistances sont aussi très faibles (pour la galvanoplastie, par exemple), on peut obtenir des courants bien plus puissants que ceux qui seraient fournis par des piles hydro-électriques. Ainsi, 100 couples bismuth-antimoine donnent une force électro-motrice d'environ un volt, pour une différence de température de 100 degrés, et la résistance peut être réduite à volonté en augmentant la section de chaque élément. En donnant à chaque barreau 2 centimètres de long et $1/10$ de centimètre carré de section, la résistance de chaque couple est de 3370 microlms, et celle de 100 couples est de 0,337 ohm seulement.

MM. J. Regnault, Ed. Becquerel et Gaugain, dans leurs expériences sur la force électro-motrice des piles, se sont servis de couples bismuth-cuivre dont les soudures étaient maintenues à 0° C. et à 100° C. On peut obtenir des couples donnant une force électro-motrice beaucoup plus grande, mais ils ont en général une plus grande résistance.

Le couple de Marcus se compose de deux alliages : le maillechort, connu sous le nom d'argent allemand (cuivre, nickel et zinc), et un alliage d'antimoine et zinc. On chauffe avec un bec de gaz.

L'élément de M. Becquerel est formé de sulfure de cuivre artificiel et d'un maillechort de cuivre et nickel. L'une des séries de soudure est chauffée au gaz à 300 degrés environ, l'autre refroidie par un courant d'eau.

En 1869, MM. Clamond et Mure ont présenté à l'Académie une pile composée d'éléments fer et galène (sulfure de plomb).

Cette pile n'était pas durable, et sa résistance intérieure augmentait beaucoup au bout de quelque temps. En 1874, M. Clamond substitua à la galène l'alliage zinc et antimoine, de Marcus, qui est bon conducteur et peut être facilement coulé, et donna à sa pile la forme suivante :

PILE DE CLAMOND.

Les barreaux sont assemblés en couronnes, BB (fig. 345), et accouplés en série. Les couronnes, composées de dix barreaux chacune, sont superposées et séparées entre elles par des rondelles d'amiante *r*. Le tout forme un cylindre dont l'intérieur est luté avec de l'amiante et chauffé au moyen d'un tuyau A en terre réfractaire, percé de trous. Le gaz mélangé à l'air sort de l'intérieur de ce tuyau et vient brûler

CORDON. Électricité. II. — 29

dans l'espace annulaire compris entre le tube et les barreaux. Les extrémités de la couronne aboutissent à des pincés en cuivre fixés sur deux planchettes. Les couronnes peuvent être accouplées en série ou en surface. Le modèle de la figure, 5 couronnes en surface, ayant chacune 7 décimètres carrés, dépense 170 litres de gaz (soit 5 centimes) à l'heure et dépose 20 grammes de cuivre. La dépense du gaz est réglée par un régulateur Giroud. Cet appareil est employé dans la galvanoplastie, notamment à l'imprimerie de la Banque. 30 couples ont la force électro-motrice d'un Bunsen.

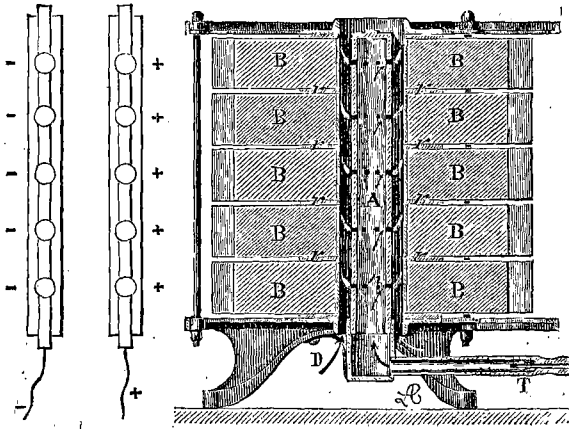


FIG. 345. — Pile de Clamond.

En 1879, M. Clamond a disposé sa pile de façon à pouvoir être chauffée au coke ou à la houille. Les gaz de la combustion, en sortant du foyer, traversent un conduit cylindrique en fonte, placé dans l'axe de l'appareil, puis circulent dans deux séries de carneaux concentriques, autour desquels se trouvent les couronnes de couples : de cette façon le chauffage n'est pas direct, et la chaleur se communique aux couples par la masse de fonte du collecteur, qui la répartit d'une manière plus uniforme. Le couple est un couple fer et alliage de bismuth-antimoine. Chaque couronne renferme 50 éléments. Les soudures extérieures sont maintenues à une température relativement basse par un diffuseur composé d'une série de lames de cuivre verticales, rayonnant autour de la pile, pour augmenter la surface de refroidissement. Les soudures chaudes étant à 360°, les soudures froides à 80°, 3000 éléments en tension donnent une force électro-

motrice de 109 volts et une résistance de 15,5 ohms. Un modèle de 6000 couples, dépensant 10 kilogrammes de coke par heure, et divisé en deux piles de 3000 éléments, peut alimenter deux lampes électriques Serrin.

PILE DE NOÉ.

Les couples (fig. 346) comprennent deux alliages : maillechort d'une part et alliage d'antimoine et de zinc de l'autre. Le maillechort est employé sous forme de fils qu'on voit au nombre de 4, partant de chaque soudure ; l'autre alliage est fondu. La soudure chauffée présente une petite capsule de laiton, du centre de laquelle se projette une tige de

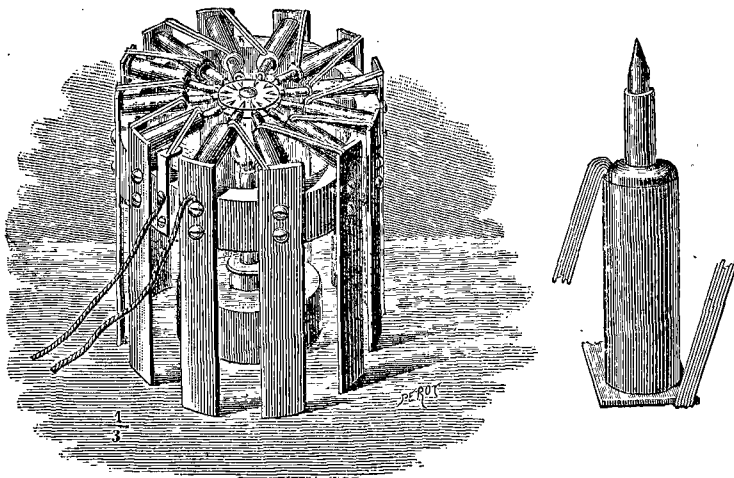


FIG. 346. — Pile de Noé.

cuiivre rouge, destinée à recevoir directement la chaleur. Pour construire l'élément, on met au fond d'un moule la capsule de laiton, dans laquelle pénètrent : 1° au centre, la tige de cuivre ; 2° latéralement, les quatre fils de maillechort. On verse le second alliage dans le moule, et, par suite, la soudure avec le maillechort est faite sans interposition d'un corps étranger, comme l'étain : l'alliage d'antimoine étant moins fusible que l'étain, on peut ainsi chauffer au-dessus du point de fusion de l'étain. La soudure froide est faite à l'étain. Pour faciliter le refroidissement, on soude, avec les alliages qui for-

ment les couples, une ou plusieurs feuilles minces de cuivre qui présentent une grande surface et sont maintenues froides, soit par la circulation de l'air, soit en les plongeant dans un bain d'eau.

La disposition générale de la pile est variable : dans le petit modèle représenté par la figure, les éléments dans chaque groupe sont placés horizontalement et se présentent comme les rayons d'un cercle, les soudures chaudes au centre, où elles sont chauffées toutes ensemble par une lampe à alcool, les soudures froides à la circonférence. Dans les modèles plus grands, on place les éléments sur deux lignes parallèles, se regardant tête à tête ; les soudures chauffées sont toutes sur la ligne axiale de l'appareil au-dessous de laquelle est placée une ligne de becs de gaz. Un groupe de 20 éléments a une force électromotrice de 1,25 volt, et une résistance de 0,5 ohm. Avec deux groupes de 20 éléments, chauffés par deux becs Bunsen, on peut faire de petites opérations de dorure, argenture, nickelage, et il en est fait usage en Autriche par les horlogers et les bijoutiers. En une ou deux minutes, l'appareil prend sa force normale ; on éteint le gaz, quand on n'en a plus besoin et toute dépense cesse. Cette pile ne s'altère pas avec le temps, car la capsule de laiton qui enveloppe la soudure chaude empêche l'accès de l'air, et par suite l'oxydation des surfaces métalliques, qui est la cause ordinaire de l'augmentation de résistance que les piles thermo-électriques éprouvent au bout de quelque temps.

CHAPITRE XLIII

ÉLECTRICITÉ DE CONTACT

Lorsque deux métaux différents sont en contact, il y a, en général, une force électro-motrice dont le siège est à la surface de jonction des deux métaux.

Si on soude, par exemple, un morceau de cuivre et un morceau de zinc, on trouve que le zinc est positif par rapport au cuivre. La théorie de l'électricité de contact de Volta repose sur ce fait.

Cette force électro-motrice ne peut pas, en général, produire un courant; car, pour former un circuit fermé avec deux métaux, il faut nécessairement deux soudures, et les forces électro-motrices qui prennent naissance aux deux soudures sont égales et opposées. On constate que l'insertion d'un métal intermédiaire ne détruit pas l'équilibre, conformément à la loi suivante :

Soient ABC trois métaux (1) disposés en circuit fermé avec des soudures AB, BC, CA; les forces électro-motrices aux surfaces de jonction étant représentées par F_{AB} , F_{BC} , F_{CA} , on aura toujours, si A, B et C sont à la même température, la relation

$$F_{AB} + F_{BC} + F_{CA} = 0.$$

La force électro-motrice entre A et B est égale et opposée

(1) C peut être le fil d'un galvanomètre.

à la somme des forces électro-motrices entre B et C et entre C et A, et cette proposition est encore vraie pour un circuit composé d'un nombre quelconque de métaux. Il est évident que, s'il n'en était pas ainsi, la loi de la conservation de l'énergie ne serait pas satisfaite ; car on pourrait obtenir un courant sans action chimique ou mécanique.

L'oubli de cette restriction (1) a conduit Volta et ses successeurs à des conséquences si fausses que Faraday fut amené à nier complètement l'existence de l'électricité de contact.

Une grande partie du second volume de ses « *Experimental Researches* » est consacrée à prouver que tous les cas supposés d'électrisation par contact peuvent être regardés comme dus à une action chimique ou mécanique.

La méprise de Faraday s'explique facilement. L'électromètre, de cette époque (1839) étant un instrument peu digne de confiance, il se servit d'un galvanomètre ; or, cet instrument ne permet pas de constater l'existence d'une différence de potentiel, il permet seulement de reconnaître ce renouvellement constant de la différence de potentiel que nous appelons le courant. Dans tous les cas qu'il cite, il est vrai de dire qu'on peut toujours faire remonter les effets observés à une cause chimique ou mécanique. On sait

(1) Volta avait bien constaté qu'une chaîne continue métallique ne produit pas de courant, à moins qu'il n'y ait des liquides interposés ; mais, pensant que les liquides n'avaient d'autre effet que d'égaliser les potentiels, et ne tenant pas compte de l'action chimique qui fournit l'énergie nécessaire à la production du courant, il ne considérait pas comme impossible de trouver des corps, même des métaux, qui égaliseraient les potentiels, et permettraient la construction d'un électro-moteur sans liquide (ou mieux sans travail chimique ni mécanique), ce qui serait contraire au principe de la conservation de l'énergie. Voy. *l'Électricité statique*, de Mascart, vol. II, p. 344, etc.

bien aujourd'hui que, quoique le contact produise une différence de potentiel, cette différence de potentiel ne produit un courant que si on emploie des moyens étrangers pour entretenir son renouvellement constant.

Dans la pile voltaïque, suivant la théorie de Volta, l'action du liquide est de ramener les deux métaux au même potentiel.

La différence de potentiel à la soudure se trouvant alors renouvelée, il en résulte un courant continu, entretenu par la dépense de l'action chimique qui s'exerce entre le liquide et un des métaux.

Le professeur Maxwell mentionne cette théorie (1), sans donner son opinion. Mais Sir W. Thomson (2) dit : « Depuis près de deux ans, j'étais persuadé que la véritable explication de l'action voltaïque, dans la disposition voltaïque ordinaire, est très rapprochée de celle de Volta.... Je regarde comme certain aujourd'hui que deux métaux, plongés dans un même liquide électrolytique, ramèneront au même potentiel (en écartant la polarisation) deux parties sèches des mêmes métaux, reliées l'une à l'autre par des arcs métalliques. »

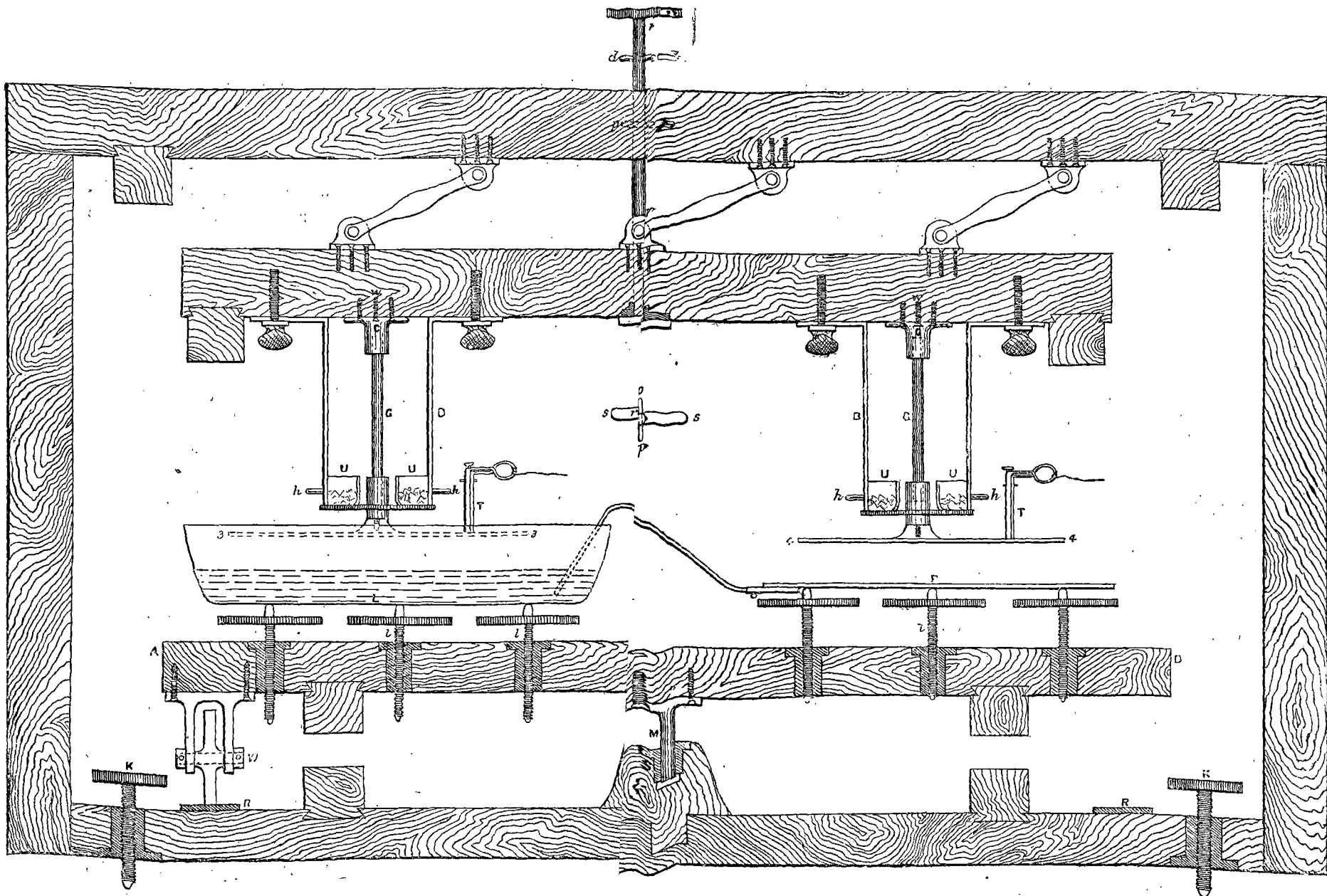
Au lieu d'égaliser les potentiels par un procédé chimique, on peut obtenir cette égalisation par un procédé mécanique, ainsi que cela a été fait par Sir William Thomson (3).

Un entonnoir de cuivre est fixé dans un cylindre de zinc isolé, comme le montre la figure 347. Le contact du cuivre et du zinc produit une différence de potentiel. De la limaille

(1) *Electricity*, 247, vol. I, p. 300.

(2) *Proceedings Lit. and Phil. Soc. of Manchester*, 21 janv. 1862, et *Papers on Electro-Statics*, p. 318.

(3) *Proc. Roy. Soc.*, 1867, vol. XVI, p. 71, et *Papers on Electro-Statics*, p. 321.



PL. LII. — Électricité de contact : A.
yvon et Perry. ($\frac{1}{5}$ de la vraie grandeur.)

de cuivre est placée dans l'entonnoir; les parcelles de limaille prennent le même potentiel que l'entonnoir, et par conséquent leur potentiel diffère de celui du cylindre de zinc. On laisse la limaille s'écouler à travers le cylindre



Fig. 317.

sans qu'elle le touche. Chaque parcelle en tombant s'électrise négativement par induction, et un petit vase isolé, disposé de façon à recueillir la limaille qui tombe, prend une charge négative qui croît rapidement. Si on relie le vase à la terre par un fil métallique, ce fil sera traversé par un courant tant que durera l'écoulement de la limaille. Il n'est pas douteux dans ce cas que la différence de potentiel ne soit due au contact, mais l'énergie nécessaire pour convertir cette différence de potentiel en courant est

fournie par le travail de la pesanteur dans la chute de la limaille.

Le 15 juin 1876, MM. Hugo Müller et Warren de la Rue (1) ont communiqué à la Société royale la description d'un appareil où l'énergie nécessaire pour permettre à l'électrisation de contact de produire un courant était obtenue à l'aide d'un mécanisme qui « mettait au contact et séparait deux disques, l'un de cuivre et l'autre de zinc, chacun de 15 centimètres de diamètre, quatre cents fois par minute, et après chaque séparation faisait toucher au disque de zinc un ressort relié à un conducteur isolé; au moyen de cames, ce mécanisme établissait en outre une communication de l'un des disques, ou des deux disques,

(1) *Proc. Roy. Soc.*, 1876, vol. XXV, p. 258

avec la terre, avant de les amener de nouveau au contact ».

Ils ont trouvé que, lorsque l'appareil donnait 320 interruptions par minute, la tension de l'électricité, comparée à celle d'un élément à chlorure d'argent, était comme 30,88 est à 1 ; c'est-à-dire que, lorsque la machine était reliée à l'électromètre, la déviation était sensiblement égale à celle qui aurait été produite par trente et un éléments en série.

On obtenait un faible courant en conduisant l'électricité à la terre à travers un galvanomètre à réflexion ; la déviation était de 35 divisions de l'échelle, soit environ $\frac{1}{140}$ partie de celle produite par deux bouts de fils de cuivre et de zinc, de 12 millimètres de longueur, tenus entre les doigts secs, l'un dans la main droite et l'autre dans la main gauche.

En faisant des disques ou gâteaux plats, composés chacun de deux substances isolantes, formant les deux moitiés du disque et suspendant, au-dessus d'eux et le long de leur ligne de séparation, l'aiguille électrisée d'un électromètre, M. Joseph Thomson (1) a constaté que l'aiguille était déviée, montrant l'existence d'une différence de potentiel entre les deux substances.

En opérant avec des disques ayant la composition ci-dessous, la substance mentionnée la première devenait (+), et la seconde (—).

(1) *Proc. Roy. Soc.*, 1876, vol. XXV, p. 169.

[C'est la méthode déjà employée par Sir W. Thomson et décrite dans les *Papers on Electro-statics and Magnetism*, p. 317 : « Une aiguille métallique isolée, mobile autour d'un axe perpendiculaire au plan d'un disque métallique formé d'une moitié de cuivre et d'une moitié de zinc, les deux moitiés étant soudées ensemble, tourne en se dirigeant du zinc vers le cuivre, quand on lui communique de l'électricité positive, et du cuivre vers le zinc quand on lui communique de l'électricité négative. »]

(+)		(-)
Verre	et	cire,
Verre	»	résine,
Verre	»	soufre,
Verre	»	paraffine solide,
Zinc	»	soufre,
Soufre	»	ébonite.

« Dans la série ci-dessus, observe-t-il, les substances suivent le même ordre que dans la série correspondante de l'électricité de frottement : cette coïncidence donne à penser que le déplacement électrique qui se produit lorsque deux corps non conducteurs sont mis au contact agit comme une cause de prédisposition, en vertu de laquelle le travail développé en les frottant l'un contre l'autre serait converti en séparation électrique. »

On a fait nombre d'autres expériences, mais sans obtenir de résultats concluants jusqu'en 1876 (1).

EXPÉRIENCES DE AYRTON ET PERRY (Pl. LII)

A la réunion de l'Association britannique de 1876, les professeurs Ayrton et Perry ont communiqué une notice préliminaire sur une série d'expériences qu'ils avaient entreprises afin de déterminer si, dans un élément galvanique, par exemple un élément de Daniell ou de Grove, etc., la force électro-motrice de l'élément était, ou n'était pas, égale à la somme algébrique de toutes les différences de potentiel mesurées, chacune séparément, aux divers contacts des substances dissimilaires composant l'élément. Un compte rendu détaillé de leurs travaux parut subséquem-

(1) Voy. Mascart, *Electricité statique*, vol. II, chap. XIV, p. 333, etc., et les mémoires récents de Clifton (*Phil. Mag.*, 5^e série, vol. V, p. 367, 1878), J. Brown (*Phil. Mag.*, 5^e série, vol. VI, p. 142, 1878, et vol. VII, p. 109, 1879) et Pellat (*Journal de physique*, vol. IX, p. 145, 1880). J. R.

ment dans les parties I et II de la « *Théorie du contact de l'action voltaïque* (1) » : on y trouve la description complète des expériences établissant la loi suivante :

« La force électro-motrice au contact de deux métaux ou de deux électrolytes, ou d'un métal et d'un électrolyte, est dans chaque cas une quantité constante, à la même température et dans un même gaz ; en d'autres termes, si AB représente la force électro-motrice au contact du métal ou de l'électrolyte A avec le métal ou l'électrolyte B (force mesurée quand A et B ne sont point en contact avec d'autres substances conductrices), AB étant identique à — BA ; alors la force électro-motrice totale d'un circuit fermé hétérogène composé des substances A, B, C, etc., N est :

$$AB + BC + \text{etc.} \quad MN + NA. \text{ »}$$

Ils ajoutent : « Il était très important de vérifier cette loi, qui n'était pas généralement regardée comme vraie. »

Par exemple, le professeur F. Jenkin, dans l'édition de son traité d'*Electricity and magnetism* de 1873, dit, à la page 44 :

« Lorsque des métaux et un électrolyte sont mis en contact, on a la succession suivante de phénomènes : 1° Si un seul métal est mis au contact d'un électrolyte, il se produit une différence définie de potentiel entre le liquide et le métal. En plongeant du zinc dans l'eau, le zinc devient négatif, l'eau positive. Le cuivre plongé dans l'eau devient aussi négatif, mais beaucoup moins que le zinc. 2° Si deux métaux sont plongés dans l'eau (comme du cuivre et du zinc), le cuivre, le zinc et l'eau forment un élément galvanique, tout le système est au même potentiel, et on

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. XXVII, p. 196, 1878.

n'observe pas de charge d'électricité dans aucune des parties du système. »

Si toutes les substances A, B, C, etc., N sont des métaux, alors

$$AB + BC + \text{etc.} + MN = AN;$$

mais s'il y a parmi elles un ou plusieurs électrolytes, solides ou liquides, les expériences des professeurs Ayrton et Perry montrent que la différence de potentiel entre A et N, quand A et N sont reliés par l'intermédiaire de B, C, etc., est égale à $AB + BC + \text{etc.} + MN$; mais de cette somme on ne peut pas conclure la valeur de AN , qui est la différence de potentiel entre A et N quand on les joint *directement*, puisque la différence de potentiel entre ces deux corps dépend du chemin que l'on suit pour aller d'un corps à l'autre, quand il y a des électrolytes dans la question.

MM. Ayrton et Perry ont employé dans leurs expériences une méthode d'*induction* pour éliminer les difficultés causées par le *contact*, avec les électrodes de l'électromètre, des substances examinées.

La méthode de mesure était la suivante : 3 et 4 (fig. 348)

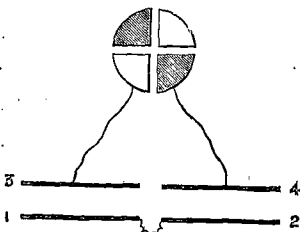


FIG. 348.

représentent deux plateaux isolés, en laiton doré, reliés aux électrodes d'un électromètre à quadrants très sensible. 1 au-dessous de 3 et 2 au-dessous de 4 sont les surfaces dont il s'agit de mesurer la différence de potentiel produite

par le contact. On relie d'abord ensemble 3 et 4, puis on les isole en les laissant toutefois en communication respec-

tive avec les quadrants correspondants de l'électromètre. On met ensuite 1 à la place de 2 et inversement; 1 est maintenant au-dessous de 4 et 2 au-dessous de 3 : la déviation que prend alors l'aiguille de l'électromètre sera une mesure de la différence de potentiel entre 1 et 2. La théorie démontre que « la différence de potentiel d observée avec l'électromètre sera proportionnelle à la différence de potentiel a qu'il s'agit de mesurer, pourvu que l'arrangement d'induction soit symétrique dans les deux positions, ou pourvu que chacune des quantités A, B et D soit nulle, A et $A + a$ étant les potentiels respectifs de 1 et 2, B le potentiel commun de 3 et 4 avant la transposition, D et $D + d$ les potentiels respectifs de 3 et 4 après la transposition. Comme il est impossible d'obtenir une symétrie parfaite dans l'appareil, cette dernière condition était toujours remplie dans les expériences ».

L'appareil effectivement employé en 1876, avec quelques perfectionnements en vue de recherches subséquentes, et tel qu'il est décrit par les auteurs dans leur mémoire n° III de 1879 (1), est représenté dans la planche LII.

Les substances dont on veut mesurer la différence de potentiel au contact sont supportées par une table AB.

Dans la planche LII, on voit, à la place qu'ils occupent dans l'appareil, un liquide L et un plateau solide P, d'une surface d'environ 530 centimètres carrés. La table AB est munie de vis calantes et repose sur trois galets de laiton, W, qui roulent sur un rail métallique circulaire très rigide, R. Pour éviter tout mouvement latéral, la table est maintenue centrée par un fort pivot en fer M, tournant dans une crapaudine de laiton S.

(1) *Phil. trans.*, 1880, p. 15.

Pour transposer les substances qui forment les plateaux inférieurs 1 et 2 de la figure 348, en faisant tourner la table, il est indispensable, si l'une d'elles est un liquide ou si toutes deux sont des liquides, de pouvoir d'abord augmenter la distance entre 1, 2 et 3, 4 afin que, dans le mouvement de rotation, 3 et 4 ne viennent pas heurter contre les parois du vase contenant le liquide.

On faisait varier cette distance en soulevant ou abaissant les plateaux supérieurs 3, 4 au moyen du « mouvement de règle parallèle » figuré dans la planche LII.

Le châssis supérieur est soulevé par la tige *rr*, munie d'une pièce transversale *pp*, laquelle peut ou bien descendre à travers la rainure *ss*, ou bien reposer sur cette rainure quand on la met en croix avec celle-ci en tournant la tige *rr*.

Les plateaux supérieurs sont supportés par des tiges de verre G bien propres et maintenues sèches par de l'acide sulfurique placé dans les coupes de plomb U.

Tout l'appareil, y compris la clef de court circuit et l'électromètre, était enfermé dans une grande cage de zinc reliée à la terre, pour éviter l'induction des corps extérieurs, et n'était pas ouvert pendant la durée d'une expérience complète, qui comprenait environ dix mises en court circuit des plateaux supérieurs, autant de demi-révolutions ou renversements de la table AB, et de lectures correspondantes de l'aiguille de l'électromètre à droite et à gauche.

Nous allons donner le détail d'une opération complète pour obtenir la différence de potentiel au contact, entre un métal et un liquide, par exemple. Supposons que tous les réglages permanents aient été effectués, et que les plateaux dorés 3 et 4 soient bien brillants. On nettoie le plateau P avec du papier d'émeri qui n'ait pas touché d'autre métal,

et on enlève toute trace d'émeri avec du drap sec et propre ; on le place ensuite sur les trois vis calantes *l*, et on le fixe dans une position déterminée par le système *trou, rainure et plan* (1). Le plat de porcelaine contenant le liquide est placé dans un vase métallique qui l'emboîte parfaitement, et dont la base est munie d'un système *trou, rainure et plan* ; ce vase est posé sur trois vis calantes *l*.

On abaisse alors la tige *rr* jusqu'à ce que le disque *dd* repose sur une plaque de laiton située sur la partie supérieure du châssis de bois au haut de l'instrument : les plateaux d'induction 3 et 4 occupent alors leur position la plus basse. On élève ensuite les vis calantes *ll* jusqu'à ce qu'une petite balle métallique, de huit millimètres de diamètre, fasse contact à la fois avec le plateau 4 et le plateau P en trois points déterminés, ou jusqu'à ce que, étant en contact avec le plateau 3, elle paraisse toucher son image réfléchie dans le liquide L. Pour éviter tout accident résultant du contact possible entre le liquide et la balle servant de jauge, cette balle était formée d'une substance qui n'était pas susceptible d'être attaquée par le liquide particulier employé dans l'expérience.

Avant d'aller plus loin, on met successivement chaque paire de quadrants à la terre, l'autre paire restant isolée, afin de vérifier qu'il n'y a pas de dérivation des aiguilles aux quadrants. Chaque paire de quadrants est ensuite chargée avec une pile, l'autre paire restant reliée à la terre, afin de vérifier qu'il n'y a pas de pertes le long des tiges de

(1) « Trou, rainure et plan. » C'est un arrangement imaginé par Sir Wm. Thomson, et permettant de replacer exactement dans la position qu'il occupait auparavant un appareil supporté par trois pieds, qui a été enlevé d'une table. Désignons les pieds par 1, 2 et 3 : on place 1 dans un petit *trou* fait sur la table ; 2, dans une *rainure* courte ayant une direction telle que son prolongement passerait par le trou ; 3 repose sur le *plan* de la table.

verre G et des petites tiges de verre supportant les quadrants de l'électromètre, ou le long des supports en ébonite paraffinée de la clef de court circuit. Quand on est bien certain qu'il n'y a pas de perte, on prend le ruban de métal qui a été découpé dans la même feuille de métal que le plateau P lui-même, et qui, pour le moment, est fixé à ce plateau par une vis d'attache soudée à P : on le rend bien brillant avec le papier d'émeri et un morceau de drap, puis on plonge son extrémité dans le liquide L, comme on le voit dans la planche LII. On ferme alors la cage de zinc, on relie les plateaux 3 et 4 ensemble et avec la terre, au moyen d'une clef (dont la manette était une longue tige d'ébonite sortant de la cage de zinc), et on prend la lecture de l'électromètre. Ensuite, 3 et 4 sont isolés l'un de l'autre et de la terre, et soulevés au moyen de la tige *rr*, qui traverse aussi la cage de zinc ; on fait tourner la table AB par-dessous à l'aide d'une poignée qui traverse la base de l'instrument ; puis on abaisse 3 et 4 et on les remet exactement dans la position qu'ils avaient précédemment, ce dont on est assuré par le mouvement parallèle de la traverse qui les supporte et par les arrêts *dd'* qui limitent la course. On prend enfin la lecture de l'électromètre. Puis, on répète toute cette série d'opérations, « mettre en court circuit, isoler, soulever, renverser, abaisser, prendre une nouvelle lecture de l'électromètre, etc. »

Quand on avait obtenu environ dix lectures, on faisait toujours une nouvelle série d'expériences avec les deux mêmes substances et de la façon suivante, afin de compenser les erreurs introduites par des défauts dans le parallélisme de l'appareil, erreurs qui n'affectent pas de la même manière le résultat que l'on obtient avec deux surfaces rigides (comme celles de cuivre et de zinc), et celui

que l'on obtient quand il s'agit d'une ou de deux surfaces liquides. Au lieu de commencer, comme précédemment, avec le liquide L sous le plateau 3 et le plateau P sous le plateau 4, on plaçait d'abord le plateau P sous 3 et le liquide sous 4; on réglait de nouveau avec les vis calantes *l* les hauteurs des surfaces, jusqu'à ce que leur distance des plateaux 3 et 4 fût encore de 8 millimètres.

On établissait ensuite le court circuit, on isolait, soulevait, renversait, abaissait, et prenait autant de lectures que dans la première série; et la moyenne des deux séries de lectures, obtenues avec les deux manières de niveler l'appareil, était adoptée comme résultat de l'expérience pour le cas particulier considéré.

« Les séries suivantes d'expériences ont été entreprises pour contrôler l'exactitude de cette assertion, contenue dans l'*Electricity* du professeur Jenkin et mentionnée ci-dessus, page 461, que lorsque du cuivre et du zinc sont tous les deux plongés dans l'eau, tous ces corps sont au même potentiel. Les plateaux 1 et 2 (fig. 348) étaient l'un en zinc, l'autre en cuivre et ils étaient mis en communication par le liquide contenu dans un petit vase n'exerçant pas d'action inductive directe sur les plateaux 3 et 4.

» On commençait tout d'abord par graduer l'appareil :

» Table VIII. — 13 avril 1876. Ecartement des plateaux = 10 millimètres.

ÉLÉMENT ÉTALON DE LATIMER CLARK

Zéro.	Lecture.	Déviaton.
955,0	892,0	63,0
954,5	1018,5	64,0
954,5	891,8	62,7
953,1	1017,1	64,0
	Moyenne.....	63,4

» La force électro-motrice de l'élément étant de 1,457 volts,

une division de déviation vaut $\frac{1,457}{63,4}$ volt. En reliant directement l'élément à l'électromètre, la déviation était de 355 divisions.

» Le rapport des indications directes de l'électromètre aux indications fournies par la disposition adoptée est donc $\frac{355}{63,4} = 5,6$.

EXPÉRIENCES :

» Zinc et cuivre en communication par de l'eau distillée à 17°C. Le zinc est négatif par rapport au cuivre.

Zéro.	Lecture.	Déviation.
953	960,2	7,2
952	947,0	5,0
952	960,0	8,0
952	946,5	5,5
951,9	961,0	9,1
952	945,0	7,0
952	961,0	9,0
952,9	946,2	6,7

» Après un intervalle de quinze minutes :

953	961,0	8,0
952,8	945,1	7,7
Moyenne....	7,32 ou 0,168 volt.	

» Zinc et cuivre en communication métallique. Zinc positif par rapport au cuivre.

Zéro.	Lecture.	Déviation.
953,0	926,0	27,0
952,7	990,0	37,3
951,0	920,3	30,7
950,1	985,1	35,0
950,0	919,5	30,5
950,2	984,6	34,4
951,0	918,0	33,0
951,1	985,2	34,1
Moyenne....	32,7 ou 0,751 volt.	

» Zinc et cuivre en communication par une solution saturée de sulfate de zinc pur à 17°C. Zinc négatif par rapport au cuivre.

Zéro.	Lecture.	Déviati.on.
952,0	961,5	9,5
951,9	944,2	7,7
951,8	960,0	8,2
951,9	943,1	8,8
952,0	960,0	8,0
952,1	944,6	7,5

» Après dix minutes d'intervalle :

Zéro.	Lecture.	Déviati.on.
953,1	960,0	6,9
953,2	945,0	8,2
953,1	961,2	8,1
953,3	945,2	8,1
953,7	961,0	7,3
953,9	945,2	8,7

Moyenne des six premières déviations... 8,3 ou 0,191 volt.
Moyenne des six dernières..... 7,9 ou 0,182 volt.

» Il résulte de ces expériences que l'assertion ci-dessus que l'on trouve dans les traités, et qui repose sur certaines expériences de Sir William Thomson, n'est vraie qu'approximativement. »

De leurs expériences et des expériences antérieures de Sir William Thomson, MM. Ayrton et Perry ont été amenés à conclure « que, lorsque du zinc et du cuivre sont plongés dans de l'eau, il y a trois états successifs à noter. Au moment où on les plonge dans le liquide, il est possible que le zinc et le cuivre soient ramenés au même potentiel, et alors la force électro-motrice E de l'élément voltaïque est égale à la différence de potentiel ZC entre le zinc et le cuivre au contact; le zinc ensuite devient négatif par rapport au cuivre, de telle sorte que E atteint une valeur

limite qui est plus grande que ZC ; enfin, si on détermine la production d'un courant en mettant en communication métallique le zinc et le cuivre, la polarisation se manifeste et le zinc devient graduellement moins négatif par rapport au cuivre, et par suite E prend une valeur inférieure à sa valeur maxima. Mais si, au lieu d'eau, on emploie une solution saturée de sulfate de zinc, le premier état, s'il existe, n'existe que pendant un temps tellement court que, dans la pratique, le zinc et le cuivre ne sont jamais au même potentiel. Ainsi, si on a soin de tenir bien isolés l'un de l'autre le zinc et le cuivre plongés dans un élément à eau, on trouve que E va en croissant à partir d'une valeur qui dépasse très peu celle de ZC , qui est la force électro-motrice de contact du zinc et du cuivre, jusqu'à une certaine limite; mais, dans un élément à sulfate de zinc, on n'observe pas un aussi grand accroissement ».

Dans les expériences suivantes, on mesurait les différences de potentiel correspondantes à un certain nombre de contacts simples de substances dissimilaires, ainsi que les forces électro-motrices d'éléments complets ou incomplets formés avec des *spécimens identiques* des matières, et aussitôt après avoir fait les essais précédents. Voici quelques-uns des résultats obtenus : supposons que Z, C et L représentent respectivement le cuivre, le zinc et le liquide d'un élément simple, L_1 et L_2 le liquide en contact avec le cuivre et le liquide en contact avec le zinc dans un élément Daniell; soit CL la force électro-motrice au contact de C et L , CL étant identique à LC . Alors :

I. Élément Daniell : solution saturée de sulfate de cuivre pur et solution saturée de sulfate de zinc à peu près pur.

$$CL_1 + E_1L_2 + I_2Z + ZC = 0,028 - 0,033 + 0,358 + 0,750 = 1,103$$

Observation de la
F. E. M. de l'élément
mesurée directement.
de 1,068 à 1,081
en croissant lentement.

II. Élément Daniell : eau distillée et solution saturée de sulfate de cuivre pur.

$$CL_1 + L_1L_2 + I_2Z + ZC = 0,028 + 0,071 + 0,126 + 0,750 = 0,975 \quad 0,995$$

III. Élément Daniell : solution très diluée de sulfate de zinc et solution saturée de sulfate de cuivre légèrement impur.

$$CL_1 + L_1L_2 + I_2Z + ZC = 0 + 0,063 + 0,177 + 0,750 = 0,990 \quad 1,010$$

IV. Élément simple : solution saturée de sulfate de zinc presque pur.

$$CL + LZ + ZC = -0,113 + 0,358 + 0,750 = 0,995 \quad 1,000$$

V. Élément simple : eau distillée.

$$CL + LZ + ZC = 0,074 + 0,126 + 0,750 = 0,950$$

de 0,832 à 0,942
en croissant lentement.

« Dans chaque cas, la somme des forces électro-motrices de contact individuelles diffère si peu du maximum de la force électro-motrice de l'élément obtenu par l'observation directe que l'on a des raisons sérieuses de conclure que la force électro-motrice due au contact de deux substances quelconques, mesurée par induction, est constante pour des spécimens de matières qui sont *exactement les mêmes*, et dans des *conditions parfaitement identiques*, en ce qui concerne la température, le milieu gazeux qui environne

les substances, etc.; et que cette force électro-motrice est tout à fait indépendante des autres substances qui peuvent se trouver dans le circuit. »

Dans les recherches qu'ils ont faites en 1877-78, et qui sont décrites dans leur troisième mémoire (1), les auteurs ont obtenu les résultats consignés dans les tableaux suivants.

MM. Ayrton et Perry font observer que, dans toutes ces expériences, il entre deux contacts avec l'air, et que jusqu'à présent aucune expérience directe n'a permis de mesurer la différence de potentiel de *chacun* de ces contacts. Ils démontrent combien il serait important de répéter leurs expériences *quantitatives*, sur la force électro-motrice de contact, dans d'autres gaz que l'air et en particulier dans un vide poussé très loin; ils mentionnent aussi que, bien qu'ils aient établi depuis le commencement de 1877 les plans de l'appareil nécessaire pour cette extension de leurs recherches, ils n'ont pu encore la commencer.

Ils ajoutent enfin : « Si les mesures que nous avons indiquées au sujet du contact avec les gaz étaient étendues à un vide parfait comme celui de Crookes, on pourrait peut-être avoir d'une façon approchée la véritable valeur de AB, c'est-à-dire de la différence de potentiel au contact de A avec B, valeur que nous devons obtenir en fait par une mesure de l'effet de Peltier.

(1) *Phil. trans. Roy. Soc.*, 1880, p. 15.

MOYENNES EN VOLTS DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL DUES AU CONTACT : SOLIDES AVEC SOLIDES DANS L'AIR (1).

	Charbon.	Cuivre.	Fer.	Plomb.	Platine.	Étain.	Zinc.	Zinc amalgamé.	Laiton.	
Charbon.....	0	0,370	0,465*	0,858	0,413	0,705*	1,096	1,208*	0,414*	La température moyenne à l'époque où ces expériences ont été faites était d'environ 48 degrés centigrades.
Cuivre.....	-0,370	0	0,446	0,542	-0,238	0,456	0,750	0,894	0,087	
Fer.....	-0,465*	-0,146	0	0,401*	-0,369	0,313*	0,600*	0,744*	-0,064	
Plomb.....	-0,858	-0,542	-0,401*	0	-0,771	-0,099	0,210	0,357*	-0,472	
Platine.....	-0,413*	0,238	0,369	0,771	0	0,600	0,981	1,425*	0,287	
Étain.....	-0,705*	-0,456	-0,313*	0,099	-0,690	0	0,281	0,463	-0,372	
Zinc.....	-1,096	-0,750	-0,600*	-0,210	-0,981	-0,281	0	0,444	-0,679	
Zinc amalgamé.....	-1,208*	-0,894	-0,744	-0,357*	-1,125*	-0,463	-0,144	0	-0,822*	
Laiton.....	-0,414	0,414	0,064	0,472	-0,287	0,372	0,679	0,822*	0	

Les nombres sans astérisque ont été obtenus directement par l'expérience, ceux avec astérisque par le calcul; en se fondant sur l'hypothèse bien connue qu'il n'y a pas de force électro-motrice dans un circuit composé de métaux tous à la même température.

Les nombres inscrits dans une colonne verticale, au-dessous du nom d'une substance, sont les différences de potentiel, en volts, entre cette substance et la substance portée sur la même ligne horizontale que le nombre, quand les deux substances sont mises en contact. Ainsi le plomb est positif par rapport au cuivre, et la force électro-motrice de contact est 0,542 volt.

Les métaux sont ceux du commerce; ils ne sont donc pas chimiquement purs.

Les auteurs font remarquer que la différence au contact entre le cuivre et le zinc, qu'ils ont trouvée exactement égale à 0,750 volt, est, lorsqu'on peut l'employer, un étalon de force électro-motrice plus commode et plus digne de confiance même que l'élément étalon de Latimer Clark.

(1) Les auteurs expliquent dans leur mémoire que, suivant toute probabilité, si on faisait des expériences quantitatives dans des gaz autres que l'air, on obtiendrait des résultats très différents.

MOYENNES EN VOLTS DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL DUES AU CONTACT : SOLIDES AVEC LIQUIDES ET LIQUIDES AVEC LIQUIDES DANS L'AIR.

	Charbon.	Cuivre.	Fer.	Plomb.	Platine.	Etain.	Zinc.	Zinc amalgamé.	Laiton.	Mercur.	Eau distillée.	Solution d'un saturée à 16° 5 C.	Solution de sulfate de cuivre saturée à 15° C.	Solution de sulfate de zinc saturée à 15° 3 C.	Solution de sulfate de zinc : densité 4,125 à 16° 9 C.	1 eau distillée, 3 solution saturée de sulfate de zinc.	Acide azotique concentré.
Mercur.	0,002	0,308	0,502	...	0,156	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Eau distillée	0,01	0,269	0,448	0,171	0,285	0,477	-0,405	0,100	0,234	...	...	...	0,043	0,464	...	...	...
Alun, saturée à 40° 5 C. à 15° C.	0,17*	0,100	0,100	0,345	0,345	0,156	+ 0,156	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Sulfate de cuivre, saturée à 15° C.	...	0,127	-0,653	0,139	0,246	-0,225	-0,536	...	-0,014	...	...	...	...	0,005	...	...	0,102
Sulfate de cuivre; densité 4,087 à 40° 6 C.	...	0,070	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Sel marin; densité 4,48 à 20° 5 C.	...	0,403	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Sel ammoniac, saturée à 15° 5 C.	...	-0,475	-0,605	-0,267	-0,856	-0,334	-0,565	...	-0,435	...	...	...	...	...	0,090	...	...
Sulfate de zinc, saturée à 15° 3 C.	...	-0,366	-0,652	-0,180	-0,057	-0,364	-0,637	...	-0,343	...	...	...	...	...	...	...	...
Sulfate de zinc; densité 4,125 à 16° 9 C.	...	...	...	...	...	...	-0,430	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1 eau distillée, mêlée avec 4 de solution saturée de sulfate de zinc.	...	...	...	...	...	...	-0,238	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1 eau distillée, mêlée avec 3 solution saturée de sulfate de zinc.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1 eau distillée, saturée de sulfate de zinc.	...	...	...	...	...	...	-0,444	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

RÉSULTATS

« Les résultats que nous avons déjà obtenus dans nos recherches actuelles se groupent d'eux-mêmes sous trois titres :

» 1° Différence de potentiel due au contact de métaux et de liquides à la même température (1) ;

» 2° Différence de potentiel due au contact de métaux et de liquides, lorsque l'une des substances est à une température différente de celle de l'autre substance en contact avec elle ; par exemple, du mercure à 20° C. en contact avec du mercure à 40° C.

» 3° Différence de potentiel due au contact du charbon et du platine avec l'eau, et avec de l'acide sulfurique dilué et concentré.

» Mais le présent mémoire ne contient que les recherches comprises sous le titre n° 1 (2). »

(1) [Les tables précédentes permettent de calculer les forces électro-motrices des éléments usuels ; il suffit de faire la somme algébrique des différences de potentiel aux divers contacts. Ainsi :

ÉLÉMENT DANIELL	ÉLÉMENT GROVE
Cuivre et solution saturée de sulfate de cuivre..... +0,070	Cuivre et platine +0,238
Solution saturée de sulfate de cuivre et solution saturée de sulfate de zinc... -0,095	Platine et acide azotique fort. +0,672
Solution saturée de sulfate de zinc et zinc..... +0,430	Acide azotique fort et acide sulfurique très dilué.... +0,078
Zinc et cuivre..... +0,750	Acide sulfurique très dilué et zinc..... +0,241
	Zinc et cuivre..... +0,750
	1,979]
1,155	

(2) Les auteurs espèrent avoir l'honneur de soumettre à la Société royale, dans une prochaine occasion, le reste de leurs expériences complètes.

ÉLECTROMOTEURS CAPILLAIRES

M. Lippmann cite un exemple intéressant de courant électrique entretenu par l'action de la pesanteur dans son mémoire sur les *Relations entre les phénomènes électriques et capillaires* (*Ann. de phys. et de chim.*, 5^e série, vol. V, 1875, p. 512).

Un entonnoir effilé contient du mercure A qui s'écoule par sa pointe.

Cette pointe plonge dans de l'eau acidulée contenue dans un verre B. Au fond de ce verre se trouve une couche de mercure B qui reçoit le mercure sortant de l'entonnoir. Au moyen des deux fils α et β , on met les deux masses de mercure en communication avec les extrémités du fil d'un galvanomètre. Celui-ci indique alors un courant, qui va de haut en bas à travers le liquide, et qui dure autant que l'écoulement, c'est-à-dire indéfiniment; car on peut indéfiniment puiser le mercure en B et le reverser en A. Le travail électrique est ici fourni aux dépens du travail mécanique que l'on accomplit en reportant le mercure de B en A.

Quand le circuit est ouvert, c'est-à-dire quand les fils α et β sont isolés l'un de l'autre, et si l'on a soin de ne pas mettre trop de mercure dans l'entonnoir, le mercure ne sort pas de la pointe où il est soutenu par un effet de capillarité. On peut s'assurer alors que α est négatif par rapport à β . Dès qu'on ferme le circuit, le courant électrique passe, et aussitôt l'écoulement du mercure se produit: si l'on interrompt le circuit, l'écoulement de mercure s'arrête de nouveau; de sorte que l'écoulement ne se produit que si l'appareil fournit un courant.

C'est ce qu'on peut vérifier aussi avec l'*électromètre capillaire* (vol. I, fig. 46, p. 243) quand α et β sont en communication métallique, le mercure dans la pointe capillaire est extrêmement mobile. On le fait osciller sans effort en pressant avec le doigt le sac en caoutchouc qui produit les pressions compensatrices. Mais si l'on isole α de β , cette mobilité disparaît tout à coup: il semble que le liquide devienne visqueux. Ou bien, α et β étant en communication métallique, on tourne la manivelle V de façon à comprimer l'air jusqu'à ce que le mercure sorte rapidement par la pointe; si on supprime alors la communication métallique entre α et β , l'écoulement s'arrête brusquement; il reprend si on rétablit la communication.

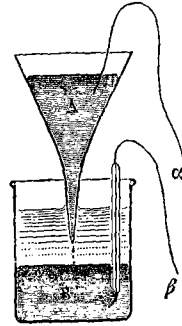


FIG. 349.

Enfin, M. Debrun a construit un nouveau producteur d'électricité (*Journal de physique*, vol. IX, p. 28, 1880) fondé sur la capillarité, et dans lequel le mercure passe de A en B dans un tube capillaire conique, en formant un chapelet de globules séparés par de l'eau acidulée. On peut arrêter l'écoulement en opposant à la pile capillaire un élément Bunsen.

M. Lippmann considère que ces expériences et celles citées dans le volume I, page 242, établissent entre les phénomènes capillaires et électriques la relation suivante : 1° la *constante capillaire* à la surface de séparation de deux liquides est fonction de la force électromotrice de polarisation sur cette surface; 2° cette force électromotrice est fonction de la variation de l'aire de cette surface, ou, encore, si par des moyens mécaniques on déforme une surface de mercure, il se produit un courant électrique qui tend à arrêter le mouvement du mercure.

Il ne fait pas intervenir dans son explication l'hypothèse qui attribue la variation de la différence électrique entre les électrodes à l'action chimique du courant (polarisation par l'hydrogène, par l'oxygène). Voir, pour plus de détails, le mémoire de M. Lippmann dans les *Annales de chimie et de physique* (5^e série, vol. V, p. 512); celui de M. Robert Sabine « sur l'électricité dégagée entre des surfaces de mercure, et sur les mouvements produits dans le mercure par la désoxydation de ce métal » (*Phil. Mag.*, supplément de décembre 1876, traduit dans les *Annales télégraphiques*, 3^e série, vol. IV, 1877, p. 232), et un second mémoire de M. Lippmann sur « les propriétés électriques et capillaires des surfaces de mercure » (*Annales de chimie et de physique*, 5^e série, vol. XII, 1877, p. 265), dans lequel l'auteur veut établir que, pour une valeur déterminée de la force électromotrice, la constante capillaire a une valeur et une seule, indépendante de la composition chimique des liquides. J. R.

CHAPITRE XLIV

DIMENSIONS DES UNITÉS (1)

Comme exemple familier de dimensions, prenons le mètre linéaire, le mètre carré et le mètre cube.

On dit que le mètre linéaire a une dimension en longueur. Le mètre carré a deux dimensions parce que c'est un (mètre)². Le mètre cube a trois dimensions parce que c'est un (mètre)³.

Ainsi une longueur est exprimée par un nombre multiplié par l'unité de longueur, et on dit que cette unité de longueur a une dimension. On dit que les unités d'aire et de volume ont respectivement deux et trois dimensions. C'est évident.

UNITÉS DÉRIVÉES. — VITESSE

Passons aux unités dérivées : la plus simple est la vitesse.

La vitesse avec laquelle un corps se meut, quand il est animé d'un mouvement uniforme, est la distance parcourue divisée par le temps employé à la parcourir. Ainsi, un train qui parcourrait 220 kilomètres dans 4 heures, aurait une vitesse de $\frac{220}{4} = 55$, si les unités de longueur et de temps étaient le kilomètre et l'heure. Si cependant on prenait pour unités le mètre et l'heure, la même vitesse serait exprimée par le nombre (55×1000) ; et si on prenait comme

(1) Le lecteur est invité à consulter sur ce sujet les *Unités et Constantes physiques*, par le docteur Everett (Macmillan). Ce chapitre en est extrait en grande partie.

unités le kilomètre et la minute, elle serait exprimée par le nombre $\frac{55}{60}$. Ainsi l'expression numérique de la même vitesse est plus grande si l'unité de longueur est plus petite : elle varie en raison inverse de l'unité de longueur.

Mais la grandeur de l'unité de vitesse est en raison inverse du nombre d'unités qui représente une vitesse donnée. L'unité de vitesse varie donc en raison directe de l'unité de longueur.

Par rapport à l'unité de temps, c'est le contraire. La valeur numérique d'une vitesse donnée est plus petite quand l'unité de temps est plus petite, et varie proportionnellement à l'unité de temps. Mais la grandeur de l'unité de vitesse est en raison inverse du nombre de ces unités qui exprime une vitesse donnée.

Ainsi, l'unité de vitesse varie en raison inverse de l'unité de temps ; en sorte que l'unité de vitesse varie en raison directe de l'unité de longueur et en raison inverse de l'unité de temps. On l'exprime en disant que la vitesse a une dimension en longueur, et une dimension moins un (-1) en temps (1).

La loi du mouvement planétaire de Kepler s'occupe de l'aire décrite dans un temps donné par la ligne droite (appelée le rayon vecteur) menée du soleil à une planète mobile. L'aire décrite dans l'unité de temps est appelée la vitesse d'aire du rayon vecteur.

Par un raisonnement exactement semblable à celui qui précède, on voit que l'unité de vitesse d'aire est proportionnelle à l'unité d'aire et en raison inverse de l'unité de temps. Ses dimensions sont donc un en aire et moins un en temps. Mais l'unité d'aire est l'unité de longueur au

(1) Voy. l'*Algèbre*, de Todhunter; théorie des indices, p. 147, art. 258.

carré, c'est-à-dire qu'elle a deux dimensions en longueur. Par suite, l'unité de vitesse d'aire a deux dimensions en longueur, et la dimension moins un en temps.

NOTATION DE MAXWELL

On a l'habitude d'écrire les unités en les mettant entre crochets.

Ainsi une longueur L s'écrit $L [L]$.

Dans cette expression, L est un nombre et $[L]$ l'unité de longueur.

D'après cette convention, on écrit alors

$$[\text{Longueur}] = [L], \quad [\text{Aire}] = [L^2], \quad [\text{Volume}] = [L^3]$$

$$[\text{Vitesse}] = [LT^{-1}] \text{ ou } \left[\frac{L}{T} \right], \quad [\text{Vitesse d'aire}] = [L^2T^{-1}] \text{ ou } \left[\frac{L^2}{T} \right].$$

UNITÉ DE FORCE

Lorsqu'un corps est animé d'un mouvement uniforme, la seconde loi de Newton (1) nous apprend qu'une force est nécessaire pour changer le mouvement, et que le changement de mouvement est proportionnel à la force imprimée.

Changement de mouvement signifie changement de vitesse, et ceci comprend changement de direction ; car, pour changer la direction du mouvement d'un corps, il faut lui donner une vitesse dans une direction inclinée par rapport à sa direction primitive. Supposons un corps se mouvant vers le nord avec une vitesse donnée ; pour qu'il se meuve dans la direction nord-est avec la même vitesse, il faut ajouter une vitesse dont la direction soit comprise entre le nord-est et le sud.

(1) Loi II : *Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressæ, et fieri secundum lineam rectam quæ vis illa imprimitur.*

GORDON. *Electricité.*

Nous avons donc un moyen naturel de mesurer les forces quand nous disons que l'unité de force est la force qui, agissant sur un corps de l'unité de masse, peut produire dans l'unité de temps un changement de vitesse égal à l'unité. Par exemple, la vitesse d'un corps qui tombe augmente continuellement, parce que la force de la pesanteur accélère son mouvement. Le nombre de centimètres par seconde dont la vitesse augmente est la mesure de la force avec laquelle la pesanteur agit sur chaque gramme du corps.

Si l'unité de vitesse est grande, l'unité de force sera une force plus grande, car elle doit produire dans un temps donné un changement de vitesse plus grand ; par conséquent, l'unité de force varie proportionnellement à l'unité de vitesse. Si l'unité de temps est grande, l'unité de force sera petite ; car, pour produire un changement donné, dans un temps long, il faut une force moindre que pour produire le même effet dans un temps court. Par suite, l'unité de force est en raison inverse de l'unité de temps, et en raison directe de l'unité de vitesse. Enfin, si l'unité de masse est grande, l'unité de force sera grande, car pour produire un changement donné de vitesse dans un temps donné sur une masse grande, il faut plus de force que si la masse était petite : l'unité de force varie donc proportionnellement à l'unité de masse.

Ainsi, l'unité de force varie en raison directe des unités de vitesse et de masse et en raison inverse de l'unité de temps ; si nous représentons respectivement par

$$[F] \quad [V] \quad [M]$$

les unités de force, de vitesse et de masse, nous avons

$$[F] = [MV.T^{-1}] \text{ ou } \left[\frac{MV}{T} \right].$$

Mais l'unité de vitesse contient aussi l'unité de temps à la puissance — 1, car $[V] = LT^{-1}$.

Substituant à $[V]$ sa valeur, nous avons donc

$$[F] = [MLT^{-1}T^{-1}] = [MLT^{-2}] \text{ ou } \left[\frac{ML}{T^2} \right].$$

RAPPORT DES UNITÉS

Il est évident que les dimensions des différentes unités ont entre elles certains rapports; ces rapports ont quelquefois une signification physique évidente, d'autres fois non. Par exemple, le rapport de volume à aire est

$$\left[\frac{L^3}{L^2} \right] = [L],$$

dont la signification est bien claire.

Le rapport de force à vitesse est

$$\left[\frac{ML}{T^2} \frac{T}{L} \right] = \left[\frac{M}{T} \right]$$

qui n'a pas de signification évidente.

LES DEUX SÉRIES D'UNITÉS ÉLECTRIQUES.

Nous savons qu'il ya deux systèmes de mesure des effets électriques. Si, dans chaque cas, nous faisons dériver des unités fondamentales de temps, longueur et masse, les unités qui doivent servir à mesurer les effets, nous obtiendrons deux systèmes différents. C'est ce que nous nous proposons de faire et, après avoir comparé les deux systèmes, nous verrons la signification physique qu'on peut donner à leur rapport.

UNITÉ ÉLECTRO-STATIQUE DE QUANTITÉ

Dans le système électro-statique, l'unité de quantité d'électricité est cette quantité qui, concentrée en un point, repousserait avec l'unité de force une autre quantité égale située à l'unité de distance. Dans le système C.G.S., l'unité d'électricité est la quantité qui repousserait une quantité égale placée à la distance de 1 centimètre avec une force de une dyne (1).

La force exercée entre deux quantités d'électricité, égales chacune à q , et à la distance l l'une de l'autre, serait $\frac{q^2}{l^2}$.

On écrira donc l'unité de force électrique $\left[\frac{Q^2}{L^2} \right]$. Mais pour que cette unité concorde avec les unités mécaniques, en fonction desquelles l'unité de force est $\left[\frac{ML}{T^2} \right]$, on doit avoir

$$\left[\frac{Q^2}{L^2} \right] = \left[\frac{ML}{T^2} \right] \quad \text{ou} \quad [Q^2] = \left[\frac{ML^3}{T^2} \right]$$

ce qui donne pour les dimensions de l'unité de quantité électrique dans le système électro-statique,

$$[Q] = \left[\sqrt{\frac{ML^3}{T^2}} \right] = \left[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1} \right].$$

UNITÉ ÉLECTRO-STATIQUE DE COURANT

La valeur numérique d'un courant en unités électro-statiques est définie, dans le système C.G.S., comme la

(1) Une dyne est la force qui, agissant sur l'unité de masse, ferait varier sa vitesse de 1 centimètre par seconde dans une seconde. La pesanteur = environ 981 dynes par gramme; le poids d'un gramme = 981 dynes; la force de la pesanteur sur un gramme = 981 dynes.

quantité d'électricité qui passe dans l'unité de temps: Les dimensions d'un courant, en mesure électro-statique, sont donc,

$$\left[\frac{Q}{T}\right] = \left[M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-2}\right].$$

UNITÉ ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE COURANT

Dans le système électro-magnétique, un courant s'écoulant le long d'un arc de cercle est mesuré par « l'intensité du champ magnétique » qu'il produit au centre de l'arc.

INTENSITÉ DE CHAMP MAGNÉTIQUE

L'intensité de champ magnétique est égale à l'intensité C du courant, multipliée par la longueur de l'arc, divisée par le carré du rayon.

Si donc $[I]$ est l'unité d'intensité de champ magnétique, on doit avoir

$$[I] = \left[\frac{CL}{L^2}\right] \text{ ou } [C] = [IL].$$

L'unité de pôle magnétique est celle qui repousse avec l'unité de force une unité de pôle similaire située à l'unité de distance. Dans le système C. G. S., c'est un pôle qui repousse un pôle similaire distant de 1 centimètre avec une force de 1 dyne. La force entre deux pôles d'intensités P_1 et P_2 est égale à leur produit divisé par le carré de la distance qui les sépare.

Nous avons donc entre les unités l'équation

$$\left[\frac{P^2}{L^2}\right] = \left[\frac{ML}{T^2}\right]$$

ou

$$[P] = \left[M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-1}\right].$$

L'intensité d'un champ magnétique est la force que su-

dirait l'unité de pôle placée dans ce champ. Désignant cette intensité par I , la force exercée sur un pôle sera IP .

D'où

$$[IP] = \left[\frac{ML}{T^2} \right]$$

Divisant les deux membres de l'équation par $[P]$, on a

$$[I] = \left[\frac{\frac{ML}{T^2}}{\frac{M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}}{T}} \right] = \left[\frac{\frac{M^{\frac{1}{2}}}{T}}{L^{\frac{1}{2}}} \right] = \left[M^{\frac{1}{2}}T^{-1}L^{-\frac{1}{2}} \right] = \left[M^{\frac{1}{2}}L^{-\frac{1}{2}}T^{-1} \right].$$

COURANT

Revenons à notre équation de courant $[C] = [IL]$, nous avons

$$[C] = \left[M^{\frac{1}{2}}L^{-\frac{1}{2}}T^{-1}L \right] = \left[M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}T^{-1} \right].$$

UNITÉ ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE QUANTITÉ

Dans le système électro-magnétique, la quantité d'électricité transportée par un courant est égale à l'intensité du courant multipliée par le temps pendant lequel il passe.

L'unité de quantité électrique dans le système électro-magnétique est donc

$$[Q] = [CT] = \left[M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}T^{-1}T \right] = \left[M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}} \right].$$

RAPPORT DES DEUX UNITÉS DE QUANTITÉ

Ajournons pour un moment la discussion des dimensions électriques, et examinons le rapport des deux unités de quantité électrique.

Nous avons

$$\text{Dimensions de la quantité électrique} \left\{ \begin{array}{l} \text{dans le système électro-statique} \quad \left[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1} \right]. \\ \text{dans le système électro-magnétique} \quad \left[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} \right]. \end{array} \right.$$

Rapport de

$$\frac{\text{Dim. en E. S.}}{\text{Dim. en E. M.}} = [L T^{-1}] \text{ ou } \left[\frac{L}{T} \right].$$

Ainsi, le rapport des dimensions des deux unités de quantité est une *vitesse*.

On verra, dans le chapitre suivant, que cette vitesse a une existence réelle, et on expliquera sa signification physique.

Nous allons maintenant donner brièvement les dimensions des autres quantités électriques.

UNITÉ ÉLECTRO-STATIQUE DE POTENTIEL

Les dimensions du travail sont la force multipliée par la distance parcourue pendant qu'elle agit.

D'où

$$[W] = [M L T^{-2} L] = [M L^2 T^{-2}].$$

Le travail produit en élevant d'une différence de potentiel V une quantité Q d'électricité est $Q V$

D'où l'on tire

$$[V] = \frac{[W]}{[Q]} = \left[\frac{M L^2 T^{-2}}{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}} \right] = \left[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1} \right].$$

UNITÉ ÉLECTRO-STATIQUE DE CAPACITÉ

La capacité d'un conducteur est le quotient de la quantité d'électricité dont il est chargé par le potentiel que cette charge lui donne.

Nous avons donc :

$$[\text{Capacité}] = \left[\frac{Q}{V} \right] = \left[\frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}}{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}} \right] = [L] \quad (1).$$

UNITÉ ÉLECTRO-STATIQUE DE RÉSISTANCE

La résistance d'un conducteur est égale au temps nécessaire pour le passage de l'unité de quantité d'électricité à travers ce conducteur, lorsqu'on maintient à ses deux bouts une différence de potentiel de une unité.

Elle varie donc en raison directe du temps, et aussi en raison directe de la différence de potentiel ; car si on augmente la différence de potentiel, il faut augmenter la résistance si l'on veut que le temps reste le même.

Elle varie en raison inverse de la quantité ; car, pour qu'il passe dans un temps donné une plus grande quantité d'électricité, il faut que la résistance soit moindre.

D'où :

$$[R] = \left[\frac{T \cdot V}{Q} \right] = \left[\frac{T \cdot M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}}{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}} \right] = [L^{-1} T] \quad \text{ou} \quad \left[\frac{T}{L} \right],$$

c'est-à-dire l'inverse d'une vitesse.

UNITÉS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES DE FORCE ÉLECTRO-MOTRICE ET DE POTENTIEL

Le travail développé quand une force électro-motrice E lance dans un circuit une quantité q d'électricité est Eq ; et le travail développé quand une différence de potentiel E lance une quantité q à travers un conducteur est aussi Eq .

(1) Comparez vol. I, p. 107.

D'où il résulte que les dimensions de la force électro-motrice, et aussi celles du potentiel, sont :

$$[E] = \left[\frac{ML^2T^{-2}}{L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}} \right] = [M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-2}].$$

UNITÉ ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE CAPACITÉ

La capacité est le quotient de la quantité d'électricité par le potentiel. Ses dimensions sont donc :

$$\left[\frac{M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}}{M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-2}} \right] = [L^{-1}T^2].$$

UNITÉ ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE RÉSTANCE

La résistance est égale à $\frac{E}{C}$.

Donc :

$$[R] = \left[\frac{M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-2}}{M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}T^{-1}} \right] = [LT^{-1}],$$

c'est-à-dire que, comme nous l'avons vu en étudiant l'unité B. A. dans le vol. I, page 619, la résistance électro-magnétique est une vitesse.

RÉSUMÉ

La table suivante résume les résultats que nous venons d'obtenir :

	Dimens. en E. S.	Dimens. en E. M.	Rapport $\frac{\text{Dim. en E. S.}}{\text{Dim. en E. M.}}$
Quantité.....	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$	$L T^{-1}$
Courant.....	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$L T^{-1}$
Capacité.....	L	$L^{-1} T^2$	$L^2 T^{-2}$
Potentiel et force électro-motrice.	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}$	$L^{-1} T$
Résistance.....	$L^{-1} T$	$L T^{-1}$	$L^{-2} T^2$

RAPPORTS DES DEUX SÉRIES D'UNITÉS ÉLECTRIQUES

L'explication suivante des rapports entre les deux séries d'unités électriques est due au professeur Everett (1) :

Nous savons que dans le système C. G. S. :	Considérons un autre système général dans lequel :
L'unité de longueur = 1 centim.	L'unité de longueur = L centim.
L'unité de masse = 1 gramme.	L'unité de masse = M grammes.
L'unité de temps = 1 seconde.	L'unité de temps = T secondes.

Alors la nouvelle unité électro-statique de quantité sera égale à

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1} \text{ unités électro-statiques C. G. S. de quantité.}$$

La nouvelle unité électro-magnétique de quantité sera égale à

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} \text{ unités électro-magnétiques C. G. S. de quantité.}$$

On peut choisir L et T de telle sorte que la nouvelle unité

(1) *Units and Physical Constants*, p. 132.

électro-statique de quantité soit égale à la nouvelle unité électro-magnétique.

Pour déterminer les valeurs de L et de T qui satisfont à cette condition, nous avons, en substituant les valeurs des nouvelles unités en unités C. G. S., l'équation

$$\left\{ M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1} \text{ unités électro-stati-} \right\} = \left\{ M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} \text{ unités électro-magnéti-} \right\} \\ \left\{ \text{ques C. G. S. de quantité.} \right\} \quad \left\{ \text{ques C. G. S. de quantité.} \right\}$$

Divisant par $M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$, il vient

$$\left\{ L T^{-1} \text{ unités électro-statiques} \right\} = \left\{ 1 \text{ unité électro-magnétique} \right\} \\ \left\{ \text{C. G. S. de quantité} \right\} \quad \left\{ \text{C. G. S. de quantité,} \right\}$$

ou le rapport de l'unité électro-magnétique C. G. S. de quantité à l'unité électro-statique C. G. S. est $\frac{L}{T}$.

$\frac{L}{T}$ est évidemment la valeur en centimètres par seconde de la vitesse qui serait représentée par l'unité dans notre « nouveau » système. $\frac{L}{T}$ est une *vitesse définie comme quantité concrète*, et sa valeur numérique sera toujours égale au rapport de l'unité électro-magnétique à l'unité électro-statique de quantité, *quelles que soient les unités de longueur, masse et temps employées.*

On observera que *le rapport des deux unités de quantité est le rapport inverse de leurs dimensions*, et on peut prouver de la même manière qu'il en est encore ainsi pour les quatre autres éléments électriques.

La dernière colonne de la table, page 490, montre que M n'entre dans aucun des rapports, et que L et T y entrent toujours avec des exposants égaux et de signes contraires,

en sorte que tous les rapports dépendent seulement de la vitesse $\frac{L}{T}$.

Ainsi, si la vitesse concrète $\frac{L}{T}$ est une vitesse de v centimètres par seconde, on aura les relations suivantes entre les unités C. G. S.

1 unité électro-magnétique de quantité	=	v	unités électro-statiques.
1 unité	—	de courant	= v —
1 unité	—	de capacité	= v^2 —
v unités électro-magnétiques de potentiel	=	1	unité électro-statique.
v^2 unités	—	de résistance	= 1 —

CHAPITRE XLV

COMPARAISON EXPÉRIMENTALE DES UNITÉS ÉLECTRO-STATIQUES ET ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

Nous avons montré que les phénomènes électro-statiques et électro-magnétiques se mesurent au moyen de deux séries différentes d'unités, ou plutôt que l'on a établi deux systèmes distincts d'unités, l'un basé sur l'unité électro-statique et l'autre sur l'unité électro-magnétique de quantité. Nous avons vu également que le rapport de l'unité électro-magnétique de quantité à l'unité électro-statique est le rapport d'une longueur à un temps, ou, en d'autres termes, une vitesse.

Par un raisonnement purement mathématique (1), et auquel il est impossible de donner une forme non mathématique, le professeur Maxwell a démontré que cette vitesse est la vitesse avec laquelle une perturbation électro-magnétique se propage à travers l'espace, c'est-à-dire que si une différence de potentiel magnétique s'établit subitement en un certain point, la perturbation qui en résulte se fera sentir à un autre point après un intervalle de temps qui, comparé à la distance des deux points, prouve que la perturbation s'est propagée avec cette vitesse. Cette vitesse n'a jamais été mesurée directement; car, même à la distance de 100 mètres, la perturbation causée par tout changement de potentiel que nous pouvons produire ne serait pas

(1) Clerk Maxwell, *Electricity*, articles 783-786, vol. II, pp. 384-387.

appréciable, et la vitesse, qui, comme nous allons le voir, est sensiblement la même que celle de la lumière, est si grande que le temps nécessaire pour que la perturbation franchisse un intervalle de courte longueur est extrêmement petit. Il serait possible cependant, si c'était nécessaire, qu'on trouvât quelque méthode de mesure directe ; mais la méthode indirecte de comparaison des unités est certainement aussi une mesure de la vitesse de la perturbation, et elle est susceptible d'une exactitude bien plus grande que celle qu'on pourrait jamais obtenir vraisemblablement par la méthode directe.

LE RAPPORT EST UNE VITESSE

Le professeur Maxwell donne, comme il suit, la preuve physique que le rapport des unités est une vitesse :

Considérons deux courants parallèles, l'attraction éprouvée par une longueur a de l'un d'eux est :

$$F = 2 CC' \frac{a}{b},$$

C et C' étant les valeurs numériques des courants en mesure électro-magnétique, et b leur distance.

Si on choisit la longueur considérée a , de telle sorte que $b = 2a$, on aura :

$$F = CC'.$$

Appelons n le nombre d'unités électro-statiques contenues dans une unité électro-magnétique, il s'agit de démontrer que n est une vitesse.

Nous savons que la quantité d'électricité transmise par un courant C dans un temps t est égale à Ct en mesure électro-magnétique, et par conséquent à nCt en mesure

électro-statique, puisque n est le nombre d'unités électro-statiques contenues dans une unité électro-magnétique.

Nous savons que la répulsion F' entre deux corps chargés statiquement, situés à la distance r l'un de l'autre, et ayant des charges q et q' est :

$$F' = \frac{qq'}{r^2} \quad (1).$$

Supposons que l'on charge deux petits conducteurs de quantités qq' égales aux quantités transmises respectivement dans le temps t par les courants CC' , leurs charges en mesure électro-statique seront :

$$q = nCt, \quad q' = nC't,$$

et la répulsion électro-statique F' qui s'exerce entre eux sera :

$$F' = \frac{nCt \times nC't}{r^2} = \frac{CC'n^2t^2}{r^2}.$$

Faisons varier la distance r jusqu'à ce que cette répulsion égale l'attraction électro-magnétique F , on aura $F = F'$ ou

$$CC' = \frac{CC'n^2t^2}{r^2}.$$

Divisant de part et d'autre par CC' , il vient

$$1 = \frac{n^2t^2}{r^2}, \quad \text{d'où} \quad n = \frac{r}{t},$$

c'est-à-dire que n , le nombre d'unités électro-statiques contenues dans une unité électro-magnétique, est égal à une longueur (r) divisée par un temps (t), ou que n est égal à une vitesse.

La grandeur absolue de cette vitesse est la même quelles que soient les unités adoptées.

(1) Vol. I, p. 23.

THÉORIE DES EXPÉRIENCES

Arrivons aux méthodes expérimentales pour la détermination du rapport des unités.

Le principe général de toutes ces méthodes est de mesurer la même grandeur électrique dans les deux systèmes électro-statique et électro-magnétique. On obtient des nombres différents dans les deux cas. Mais lorsque la même grandeur est mesurée avec deux séries différentes d'unités, le rapport des nombres obtenus dans les deux cas est l'inverse du rapport des unités employées.

Supposons, par exemple, que nous ne connaissions pas le rapport d'un décimètre à un mètre, mais que nous ayons le moyen de mesurer une certaine distance à la fois en décimètres et en mètres.

Pour déterminer le rapport de ces unités, nous prendrons une certaine distance arbitraire que nous mesurerons en nous servant, comme unité, du mètre d'abord, puis du décimètre.

Supposons que le nombre obtenu soit 60 dans le premier cas et 600 dans le second, le rapport du nombre obtenu avec le mètre comme unité au nombre obtenu avec le décimètre comme unité est égal au rapport de 60 à 600 ou de 1 à 10. Par conséquent, le rapport du mètre au décimètre est l'inverse de ce rapport, ou le rapport de 10 à 1.

De même, dans le cas électrique, on mesure la même quantité d'électricité, d'abord en unités électro-statiques, puis en unités électro-magnétiques.

Le rapport des nombres obtenus est égal à l'inverse du rapport de l'unité électro-statique à l'unité électro-magnétique de quantité.

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES DE DÉTERMINATION DU RAPPORT
ENTRE LES UNITÉS ÉLECTRO-STATIQUES ET ÉLECTRO-MAGNÉ-
TIQUES

La première détermination numérique de cette vitesse a été faite par Weber et Kohlrausch (1).

Le professeur Maxwell donne de ces expériences le compte rendu suivant :

« Leur méthode était fondée sur la mesure de la même quantité d'électricité, d'abord en mesure électro-statique, puis en mesure électro-magnétique.

» La quantité d'électricité mesurée était la charge d'une bouteille de Leyde. Sa valeur en mesure électro-statique était le produit de la capacité de la bouteille par la différence de potentiel de ses armatures.

» La capacité d'une sphère est exprimée en mesure électro-statique par son rayon. La capacité de la bouteille que l'on mesurait était donc représentée par une certaine longueur (2).

» La différence des potentiels des armatures de la bouteille était mesurée en réunissant les armatures aux électrodes d'un électromètre dont les constantes avaient été soigneusement déterminées, de façon à connaître la différence des potentiels en mesure électro-statique. En multipliant cette différence par la capacité de la bouteille, la charge de la bouteille était exprimée en mesure électro-statique. »

Pour déterminer la valeur de la charge en mesure électro-magnétique, on déchargeait la bouteille à travers la bobine d'un galvanomètre. Le courant total pouvait être calculé

(1) Pogg. XCIX, 10 août 1856, et Maxwell, 771, vol. II, p. 370.

(2) Voy. vol. II, p. 487.

d'après l'écart limite de la première impulsion de l'aiguille.

Cette comparaison donnait pour le rapport des unités, rapport qu'on a l'habitude d'appeler v ,

$$v = 3,1074 \times 10^{10} \text{ centimètres par seconde.}$$

Le professeur Maxwell fait observer que le phénomène auquel on donne le nom d' « absorption électrique », et qui n'était pas bien connu à la date de ces expériences, rend presque impossible une estimation correcte de la charge de la bouteille, à moins qu'on ait opéré presque instantanément. Il démontre que si on a négligé l'absorption, il doit en résulter comme conséquence que la valeur de v obtenue par cette méthode est trop forte.

COMPARAISON DE SIR W. THOMSON (pl. LIII)

Sir W. Thomson a déterminé v , le rapport des unités, en mesurant la même force électro-motrice dans les deux systèmes d'unités.

Une force électro-motrice est mesurée directement en unités électro-statiques au moyen d'un électromètre.

Nous savons par la loi de Ohm que $E = Cr$, et C et r peuvent être mesurés en mesure électro-magnétique.

Car supposons que E soit égal à A unités électro-statiques, et que le courant C , que E peut produire à travers une résistance r , soit tel que $Cr = B$ unités électro-magnétiques; alors, si on mesure A et B , on doit avoir $\frac{B}{A} = v$, qui est le rapport cherché; car l'unité électro-statique de potentiel égale v unités électro-magnétiques.

Dans les expériences de Sir W. Thomson, la différence de potentiel était mesurée (statiquement) par des électromètres, et le courant, à travers une résistance connue, par

la déviation de la bobine suspendue d'un électro-dynamomètre (1).

La planche LIII, page 504, montre la disposition de l'expérience (2).

Elle nécessite peu d'explications. Le dynamomètre a été déjà décrit, ainsi que les divers électromètres. Le circuit principal comprend les bobines de résistance, la pile et le dynamomètre, avec des embranchements conduisant à l'électromètre absolu. La jauge, la batterie de bouteilles de Leyde et le rechargeur sont les accessoires usuels de l'électromètre.

L'électromètre à quadrants n'était employé que comme un moyen commode de déterminer la résistance des bobines du dynamomètre au cours des expériences ; on éliminait ainsi les variations de résistance dues aux changements de température produits par le courant. On s'en servait en reliant ses électrodes alternativement aux extrémités de la bobine de résistance, dont la résistance était connue, et à celles des bobines du dynamomètre.

De ce que nous avons dit à la page 655 du vol. I, on peut déduire que dans un circuit la résistance entre deux points est simplement proportionnelle à la différence des potentiels de ces points. Il en résulte que la résistance du dynamomètre est à celle des bobines comme la différence des potentiels aux deux bouts du dynamomètre est à la différence des potentiels aux deux bouts de la bobine de résistance.

La pile employée se composait de soixante éléments Daniell à sciure de bois, réunis en série.

Sir W. Thomson a donné en 1869 la valeur suivante déterminée par cette méthode : « Onze séries d'expériences

(1) Vol. II, p. 31.

(2) *Reports on Electrical Standards*, p. 186.

faites à diverses dates, du 10 mars au 8 mai 1868, ont indiqué pour le rapport appelé v des valeurs dont la plus grande était $2,92 \times 10^{10}$, la plus petite $2,754 \times 10^{10}$, et la moyenne $2,825 \times 10^{10}$ centimètres par seconde. »

Sir W. Thomson, à la fin de son mémoire, annonce qu'il a l'intention de pousser ses expériences à un degré d'exactitude beaucoup plus grand.

EXPÉRIENCES DE MC KICHAN

Son intention a été réalisée par M. Dugald Mc Kichan qui, en 1870-72, a fait, dans le laboratoire de Sir W. Thomson, une série de mesures dont les résultats ont été communiqués à la Société Royale, le 15 avril 1873, et insérés dans les *Philosophical transactions* de cette même année (1). Les expériences ne diffèrent que par des détails de celles déjà décrites.

La série finale des valeurs de v , déterminée le 21 février 1872, était la suivante :

v en centimètres par seconde.	v en centimètres par seconde.
$2,934 \times 10^{10}$	$2,923 \times 10^{10}$
2,935 —	2,935 —
2,931 —	2,935 —

La valeur moyenne adoptée par M. Mc Kichan est

$$2,93 \times 10^{10}.$$

COMPARAISON DIRECTE DE CLERK MAXWELL

Le professeur Clerk Maxwell a comparé les deux unités de force électro-motrice en équilibrant l'attraction entre deux disques, chargés d'électricités opposées, par la répulsion entre deux courants passant dans deux bobines plates

(1) *Phil. trans.*, 1873, p. 409. La théorie mathématique des expériences est donnée complètement dans ce mémoire.

de résistances connues : on connaissait le rapport entre les forces électro-motrices employées à charger les disques et à envoyer les courants à travers les spires, et les forces électro-motrices étaient mesurées électro-statiquement.

La planche LIV montre la disposition des expériences.

Un disque et une spirale étaient fixes, l'autre disque et l'autre spirale étaient attachés ensemble au même bout du levier de la balance de torsion.

A l'autre bout du levier était fixée une bobine exactement semblable, que le même courant traversait dans la direction opposée à celle qu'il avait en traversant la première bobine suspendue. Cette bobine supplémentaire avait pour effet de neutraliser l'action du magnétisme terrestre sur le levier de la balance de torsion. Le petit disque suspendu était entouré d'un anneau de garde semblable à celui que Sir William Thomson emploie dans ses électromètres absolus. On s'assure ainsi que l'action électrique sur le petit disque est bien égale à celle due à une distribution uniforme sur sa surface de devant. Le disque suspendu avait 10,16 centimètres de diamètre, et était maintenu au même potentiel que la cage de l'instrument.

Le disque fixe avait 15,24 centimètres de diamètre et pouvait être rapproché ou éloigné de l'anneau de garde au moyen d'une vis micrométrique. Il était isolé et maintenu à un potentiel élevé pendant les expériences. Lorsque le disque suspendu était dans sa position d'équilibre, son plan correspondait avec celui de l'anneau de garde.

Les bobines étaient fixées sur les faces de derrière des disques fixe et suspendu ; des précautions spéciales étaient prises pour isoler la bobine en contact avec le disque que l'on voulait charger à un potentiel élevé.

On donnait la charge électro-statique en reliant les disques

aux électrodes d'une grande pile de 2600 éléments chargés avec du sublimé corrosif. La différence de potentiel à ses extrémités était mesurée en observant, au moyen d'un galvanomètre, le courant qu'elle envoyait à travers une très grande résistance connue. Les courants qui passaient dans les bobines étaient produits par une pile plus petite, et mesurés à la façon ordinaire par un galvanomètre.

Nous avons ainsi deux forces électro-motrices dont le rapport est connu; l'action de l'une est électro-statique et celle de l'autre est électro-magnétique. Leur grandeur peut être réglée de telle sorte que l'attraction des disques égale la répulsion des bobines, c'est-à-dire de telle sorte que le levier suspendu de la balance de torsion soit en équilibre; et quand on a fait des corrections convenables pour les différentes distances séparant les disques des bobines, on a du même coup tous les éléments pour la comparaison des actions électro-statique et électro-magnétique de la même pile. Les résultats des expériences du professeur Maxwell donnent donc une valeur directe de la relation entre les unités électro-statique et électro-magnétique de force électro-motrice.

Voici une série de valeurs de v donnée par le professeur Maxwell :

2,8591 $\times 10^{10}$	|	2,8762 $\times 10^{10}$
2,8430 —	|	2,8795 —
2,8886 —	|	2,8735 —
2,8686 —	|	2,8752 —
2,8910 —	|	2,8709 —
2,8850 —	|	2,9474 —

Valeur moyenne de v : 2,8798 $\times 10^{10}$

ou 288 000 000 mètres par seconde,

ou 288 000 kilomètres par seconde.

L'erreur probable est d'environ un sixième pour cent.

DÉTERMINATION D'AYRTON ET PERRY (1).

A la réunion de l'Association Britannique tenue à Dublin en 1878, le professeur W. E. Ayrtton a rendu compte d'une détermination de v , faite récemment au Japon par le professeur Perry et par lui.

La méthode adoptée par eux consistait à mesurer la capacité d'un condensateur à air, dont chaque plateau avait une surface de 1323,14 centimètres carrés, à la fois en mesure électro-statique et en mesure électro-magnétique.

La capacité électro-statique était déterminée d'après les mesures linéaires du condensateur, et la capacité électro-magnétique en notant la grandeur de la première impulsion obtenue en déchargeant le condensateur à travers un galvanomètre *balistique* de forme spéciale qu'ils avaient imaginé dans ce but : ce galvanomètre comprenait quarante aimants divisés en deux masses sphériques, de façon à obtenir une grande sensibilité, en même temps que très peu d'amortissement par la résistance de l'air (voir vol. I, page 497) (2).

La source d'électricité était une pile de 382 éléments Daniell neufs. Pour déterminer la relation de la pile avec les constantes du galvanomètre, on envoyait directement à travers le galvanomètre une fraction connue du courant ; de cette façon, par l'écart-limite de l'impulsion que produisait la décharge du condensateur à travers le galvanomètre, on pouvait déterminer sa capacité en mesure électro-magnétique, indépendamment de l'intensité du champ magnétique dans le laboratoire.

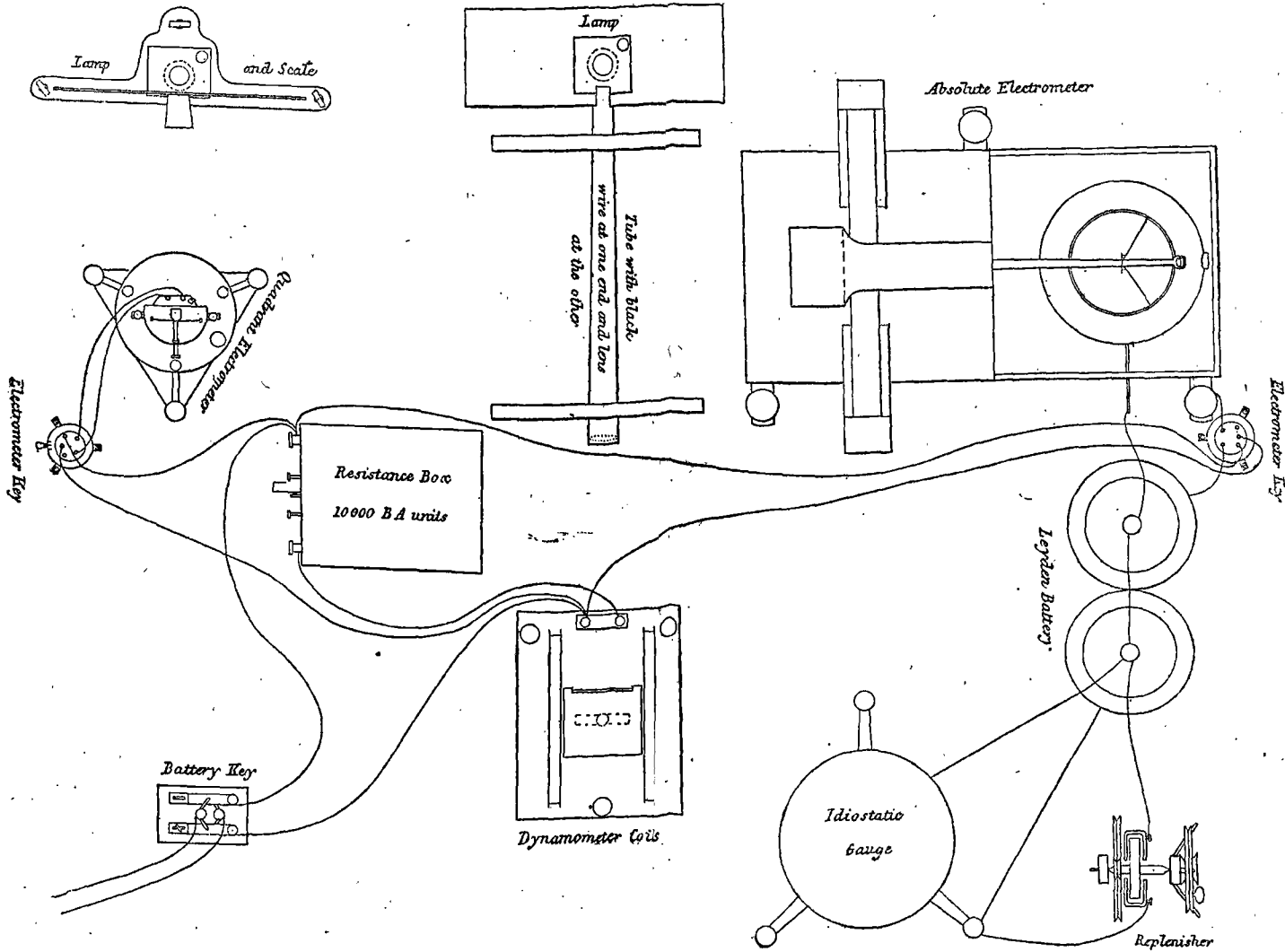
(1) *Report, Brit. Assoc.*, Dublin, 1878, p. 487; ou *Phil. Mag.*, 1879, I, p. 277, et *Journ. Soc. Tel. Engineers*, mai 1879.

(2) La durée de période de l'oscillation était d'environ 42 secondes

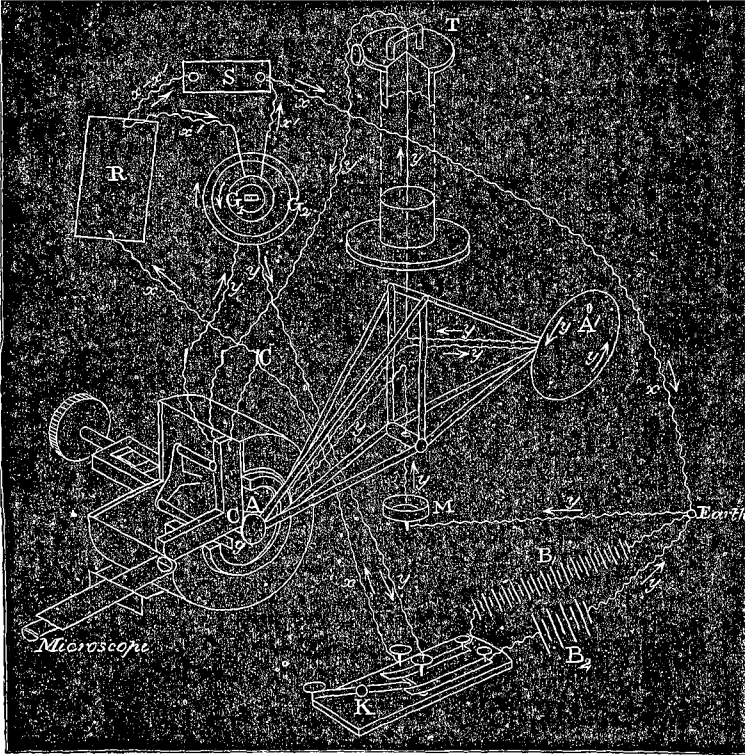
Battery Key = clef de pile. — Resistance box = boîte de résistance. — Electrometer Key = clef de l'électromètre.
 — Quadrant electrometer = électromètre à quadrants. — Lamp and scale = lampe et échelle. — Dynamometer Coils = bobines du dynamomètre.

Dynamometer Scale

Tube with black wire at one end and lens at the other = tube avec un fil noir à un bout et une lentille à l'autre. — Lamp = lampe. — Dynamometer scale = échelle du dynamomètre. — Absolute electrometer = électromètre absolu. — Leyden Battery = bouteilles de Leyde. — Replenisher = rechargeur. — Idiostatic gauge = jauge idiostatique.



Pl. LIII. — Rapport des unités électriques. — Thomson.



PL. LIV. — Rapport des unités. — Maxwell. (*Earth = Terro.*)

EXPLICATION DE LA PLANCHE LIV

A. Disque et bobine suspendus. — A'. Disque et bobine formant contrepois. — C. Disque et bobine fixes. — B₁. Grande pile. — B₂. Petite pile. — G₁. Circuit primaire du galvanomètre. — G₂. Circuit secondaire du galvanomètre. — R. Grande résistance. — S. Dérivation. — K. Double clef. — G. Electrode du disque fixe. — *x*. Courant à travers R. — *x'*. Courant à travers G₁. — *x-x'*. Courant à travers S. — *y*. Courant à travers les trois bobines et G₂. — M. Coupe à mercure. — T. Tête de torsion et vis tangente. — *g*. Échelle en verre graduée.

G et S sont à 3 mètres environ de la balance électrique.

La vitesse cherchée v était l'inverse du rapport des racines carrées des deux déterminations de capacité (1), et MM. Ayrton et Perry font remarquer que leur méthode a l'avantage de donner une formule de réduction des observations dans laquelle entre seulement la *racine carrée* d'une résistance, en sorte que s'il existe quelque erreur inconnue dans les bobines de résistance, on n'introduit dans le résultat que la *racine carrée* de cette erreur, tandis que, dans les méthodes précédemment décrites, l'erreur dans v est proportionnelle à l'erreur dans les bobines : ils font valoir en outre que leur méthode n'exige qu'un seul instrument précis de mesure électrique, un galvanomètre balistique, tandis que les autres méthodes en nécessitent deux, tels que : un électromètre absolu combiné avec un galvanomètre, etc.

Les résultats suivants ont été obtenus à trois jours différents :

1878.	v .
18 juin.....	$2,974 \times 10^{10}$
23 —	$2,995 \times 10^{10}$
25 —	$2,972 \times 10^{10}$
Moyenne de 98 décharges du condensateur à air.	$2,980 \times 10^{10}$

EXPÉRIENCES DE HOCKIN

Le 26 août 1879, M. Charles Hockin a lu devant l'Association Britannique une « Note sur la capacité d'un certain condensateur et sur la valeur de v » (2).

La méthode employée pour la détermination de v était identique à celle de MM. Ayrton et Perry.

Le résultat était :

$$v = 2,988 \times 10^{10} \text{ centimètres par seconde.}$$

(1) Car une unité électro-magnétique de capacité est égale à v^2 unités électro-statiques.

(2) *Report, Brit. Assoc., Sheffield, 1879, p. 285.*

NATURE PHYSIQUE DE v

Pour obtenir une conception physique de cette vitesse, considérons un phénomène prédit par le professeur Maxwell (1), comme conséquence de la théorie, et vérifié expérimentalement après coup par le professeur Rowland (2).

Le professeur Maxwell a prédit que si un corps chargé statiquement pouvait se mouvoir avec la vitesse d'un courant électrique, il agirait sous tous les rapports comme un courant électrique transportant la même quantité d'électricité par seconde.

Si deux surfaces planes chargées d'électricité de même espèce sont placées parallèlement l'une près de l'autre, et si on leur imprime un mouvement rapide dans leur propre plan et avec la même vitesse, il arrivera, pour une certaine vitesse, que leur attraction électro-magnétique sera exactement équilibrée par leur répulsion électro-statique, et qu'aucune force ne s'exercera entre eux. M. Maxwell démontre que la vitesse qu'il faut imprimer aux plans mobiles pour qu'aucune action mécanique ne s'exerce entre eux, est précisément égale au rapport des unités électriques.

Il en résulte qu'on peut définir le rapport des unités électriques « une vitesse telle que deux surfaces électrisées, se mouvant dans la même direction avec cette vitesse, n'exercent aucune action l'une sur l'autre ».

EXPÉRIENCES DE ROWLAND

Le professeur Maxwell fait remarquer que, quoiqu'il soit évidemment impossible de faire mouvoir un corps chargé avec la vitesse de l'électricité, il est cependant pos-

(1) *Electricity*, 769, vol. II, p. 369.

(2) Voy. ci-après.

sible de le faire mouvoir assez rapidement pour qu'il développe un effet magnétique appréciable.

Le 15 juin 1875, le professeur Helmholtz a lu devant l'Académie de Berlin (1) un compte rendu de quelques expériences, faites par le professeur Rowland, sur l'effet magnétique d'un corps chargé d'électricité statique mis en mouvement.

Dans ces expériences, un disque d'ébonite doré, de 21,1 centimètres de diamètre, tournait dans le voisinage d'une aiguille astatique à la vitesse de soixante et un tours par seconde. Le disque était électrisé en le reliant à une bouteille de Leyde chargée. Le potentiel électro-statique était déterminé en examinant la longueur de l'étincelle produite par cette charge; et en la comparant aux tables de Sir William Thomson donnant la « force électro-motrice nécessaire pour produire une étincelle » (2).

L'effet magnétique était déterminé en observant la déviation des aiguilles au moyen d'un miroir et d'une échelle disposés comme d'habitude.

Après avoir observé l'effet magnétique, le professeur Rowland calcule ce qu'aurait été cet effet si v avait eu les valeurs respectives données par Weber et Maxwell, et il trouve que le nombre observé est compris entre les deux nombres calculés.

Le professeur Rowland ne va pas plus loin, car ses expériences n'avaient pas pour but de faire une mesure de v . Mais, par une simple interpolation entre les effets magnétiques calculés en prenant pour v les valeurs trouvées respectivement par Maxwell et Weber, on peut trouver la

(1) *Berlin Monatsbericht*, 1876, p. 211, traduit dans le *Phil. Mag.*, septembre 1876, p. 233.

(2) Vol. II, p. 129.

valeur v qui correspond exactement à l'effet magnétique observé. Le résultat de ce calcul est :

$$v = 3,0448 \times 10^{10} \text{ centimètres par seconde.}$$

Dans l'exposé que je viens de faire de ces expériences, j'ai laissé de côté les détails des nombreuses corrections, etc., qui complètent le travail du professeur Rowland.

RÉSUMÉ

On a pour v les valeurs suivantes :

Expérimentateurs.	v
	10^{10} centimètres par seconde.
Weber et Kohlrausch.....	3,1074
Thomson.....	2,825
Maxwell.....	2,8798
Mc Kichan.....	2,93
Ayrton et Perry.....	2,980
Hockin.....	2,988
D'après Rowland.....	3,0448
Moyenne des quatre dernières.....	2,9857

Un examen attentif des expériences montre que les quatre dernières déterminations sont beaucoup plus dignes de confiance que celles plus anciennes, et j'ai adopté, en conséquence, comme valeur de v la plus probable :

$$2,9857 \times 10^{10} \text{ centimètres, ou } 298\,570 \text{ kilomètres par seconde.}$$

QUATRIÈME PARTIE

RELATIONS ENTRE L'ÉLECTRICITÉ ET LA LUMIÈRE ou ÉLECTRO-OPTIQUE

CHAPITRE XLVI

ROTATION MAGNÉTIQUE DU PLAN DE POLARISATION DE LA LUMIÈRE (1)

PRÉLIMINAIRES

La lumière naturelle, consiste en vibrations toujours situées dans un plan perpendiculaire à la direction du rayon lumineux, mais s'exécutant dans toutes les directions contenues dans ce plan. En d'autres termes, si le rayon se propage suivant l'essieu d'une roue, les vibrations qui le composent sont toutes dans le plan de la roue, mais s'exécutent indifféremment suivant l'un ou l'autre des rais de la roue.

Lorsque la lumière se réfléchit sur certaines substances,

(1) Je recommande au lecteur, qui ne connaîtrait pas les éléments de la théorie de la lumière polarisée, de lire *The polarisation of Light*, par Wm. Spottiswoodé, Pres. R. S., etc. Nature Series (Macmillan).

sous certains angles, ou lorsqu'elle traverse certaines substances cristallines, toutes les vibrations sont ramenées dans la même direction, c'est-à-dire suivant un rais déterminé de la roue et le rais opposé.

On dit alors que la lumière est polarisée. Si maintenant la roue glisse le long de l'essieu sans tourner, le rais suivant lequel s'exécutent les vibrations décrit un plan.

Lorsqu'aucune force de rotation n'est appliquée à la lumière polarisée, les vibrations s'exécutent toutes dans ce plan que l'on appelle « plan de polarisation », et on dit que la lumière est « polarisée dans un plan ».

Si nous faisons tourner le réflecteur ou le cristal qui sert de polariseur autour de la direction du rayon, comme axe, ce plan tournera comme si nous faisons tourner sur son essieu la roue, et, par suite, le rais suivant lequel s'exécutent les vibrations ; en faisant glisser la roue le long de son essieu, le rais décrira toujours un plan, seulement ce plan ne sera plus le même qu'auparavant. Ainsi, si nous faisons tourner le miroir ou le cristal polariseur, le plan de polarisation tourne, mais la lumière reste polarisée.

Nous ne pouvons reconnaître à l'œil dans quel plan la lumière est polarisée, ni même si elle est ou non polarisée. Pour cette étude, il faut appliquer la loi naturelle suivante :

Les corps transparents, susceptibles de polariser la lumière dans un plan donné, sont opaques à la lumière déjà polarisée perpendiculairement à ce plan ; les surfaces réfléchissantes, susceptibles de polariser la lumière dans un plan donné, ne réfléchissent plus la lumière incidente déjà polarisée dans un plan perpendiculaire à ce plan.

Ainsi, pour déterminer dans quel plan la lumière est polarisée, nous n'avons qu'à prendre un cristal susceptible de polariser la lumière dans un plan fixe par un rapport à

son axe, et à le faire tourner jusqu'à ce que la lumière soit éteinte.

Nous savons alors que la lumière est polarisée dans un plan perpendiculaire à ce plan fixe du cristal.

ROTATION NATURELLE

Certaines substances naturelles, comme l'essence de térébenthine, la créosote, etc., ont la propriété de faire tourner le plan de polarisation, c'est-à-dire que, si un rayon horizontal de lumière polarisée dans un plan horizontal traverse un tube plein d'une de ces substances, le plan de polarisation à la sortie ne sera plus horizontal, mais incliné d'un côté ou de l'autre de l'horizontale, suivant la nature de la substance.

Dans une même substance, la grandeur de l'inclinaison dépend de la longueur de la colonne de cette substance traversée par le rayon lumineux.

DÉCOUVERTE DE LA ROTATION MAGNÉTIQUE PAR FARADAY

Faraday a découvert que si un morceau d'une espèce particulière de verre, connue sous le nom de « verre pesant », est placé entre les pôles d'un électro-aimant, et qu'un rayon de lumière polarisée le traverse d'un pôle à l'autre, il y a rotation du plan de polarisation. C'est-à-dire que si nous supposons la lumière à l'entrée polarisée dans un plan horizontal, à la sortie elle est toujours polarisée, mais dans un plan incliné sur l'horizon. La direction de cette inclinaison dépend de la polarité de l'aimant. Si l'on change cette polarité en renversant le courant, le sens de la rotation est changé. Faraday reconnut ensuite que bien d'autres substances peuvent produire le même effet quand elles sont soumises à l'action magnétique.

Ainsi, au premier abord, le phénomène magnétique paraît analogue à celui de la rotation par l'essence de térébenthine, etc. Mais il y a entre les deux cas une différence importante.

DIFFÉRENCE ENTRE LA ROTATION MAGNÉTIQUE ET LA
ROTATION NATURELLE

Si au lieu de laisser sortir la lumière, nous la réfléchissons en sens inverse en la faisant tomber perpendiculairement sur un miroir placé au bout de la colonne de térébenthine ou de verre, nous trouvons que : *dans le cas où la rotation est produite par la force magnétique, la rotation est doublée ; et dans le cas où elle est produite par la propriété naturelle de la substance, la rotation est annulée ;* de plus, si les deux bouts du verre pesant ou du tube qui contient la térébenthine sont argentés, et si l'on fait passer la lumière, de façon qu'elle soit réfléchié alternativement dans les deux sens un certain nombre de fois (fig. 350), nous trouverons : dans le cas de la rotation

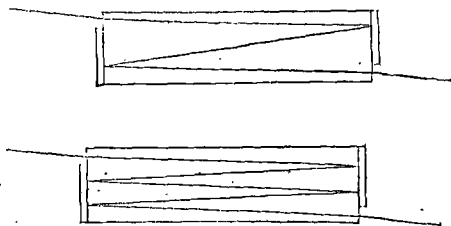


FIG. 350.

magnétique, que la rotation est égale à autant de fois la rotation initiale qu'il y a eu de passages de la lumière à travers la substance ; dans le cas de la rotation naturelle, qu'elle est nulle ou égale à la rotation initiale, selon que

la lumière traverse la substance un nombre pair ou un nombre impair de fois.

Un exemple mécanique peut nous aider à comprendre cette distinction. Représentons, comme précédemment, le plan de polarisation par la direction de l'un des rais d'une roue, et faisons glisser la roue sur son axe, en avant et en arrière; faisons-la tourner en même temps, de façon que le rais soit toujours dans le plan de polarisation correspondant au point de l'axe où se trouve la roue. Nous figurerons alors le cas de la rotation naturelle, en supposant que, dans son mouvement circulaire, la roue soit guidée par une spirale ou un long filet de vis taillé dans son axe. De la sorte, quand la roue avance, le rais décrit une surface torse, le long de laquelle il revient quand la roue glisse dans la direction inverse.

Le cas de la force magnétique sera figuré, au contraire, en supposant que la roue *tourne constamment dans la même direction, sous l'influence de quelque force extérieure*, la tension d'une corde enroulée autour de sa circonférence, par exemple, en même temps que la roue glisse en avant et en arrière. Supposons, comme précédemment, que le rais reste toujours dans le plan de polarisation : la surface torse qu'il décrit maintenant est toute différente; car, lorsque la roue commencera à glisser en arrière le long de son axe, le rais ne repassera plus par son ancien chemin, mais décrira une nouvelle surface dont la torsion est égale et opposée à la torsion de la première.

MÉMOIRE DE FARADAY

Faraday communiqua sa découverte à la Société Royale, le 6 novembre 1845, dans un mémoire intitulé :

« *De la magnétisation de la lumière, et de l'éclairement*

des lignes de force magnétique. 1° Action des aimants sur la lumière; 2° Actions des courants électriques sur la lumière; 3° Considérations générales (1). »

Il commence son mémoire comme il suit :

« ACTION DES AIMANTS SUR LA LUMIÈRE

» Depuis longtemps c'était mon opinion, presque ma conviction, partagée d'ailleurs, je crois, par bien d'autres parmi ceux qui aiment les études naturelles, que les différentes formes sous lesquelles se manifestent les forces de la matière, ont une origine commune; en d'autres termes, qu'elles sont dans une telle relation, dans une telle dépen-

(1) *Phil. Trans.*, 1846, p. 1. *Exp. Res.*, 2146, vol. III, p. 1.

La note suivante a été ajoutée par Faraday au titre de son mémoire :

« Le titre de ce mémoire, paraît-il, a induit bien des personnes en erreur sur son contenu, c'est pourquoi je prends la liberté d'ajouter cette note explicative : Je n'accepte ni ne rejette l'hypothèse d'un éther, ou celle de l'émission, ou toute autre manière de voir sur la nature de la lumière; autant que j'en puis juger, on ne sait rien de réel sur les rayons de lumière, pas plus que sur les lignes de force magnétique ou électrique, ou même de gravitation, sauf que les uns et les autres se manifestent dans les corps et par les corps. Je crois que, dans les expériences que je décris dans ce mémoire, la lumière a subi une modification magnétique, c'est-à-dire que ce qui est magnétique dans les forces de la matière a été modifié, et, par réaction, a modifié ce qui est véritablement magnétique dans la force de la lumière; et dans le terme magnétique, je comprends ici tous les effets particuliers que peut exercer le pouvoir d'un aimant, que ce pouvoir se manifeste dans les corps magnétiques ou dans les corps diamagnétiques. La phrase « Éclaircissement (illumination) des lignes de force magnétique », a été entendue comme impliquant que j'avais rendu ces lignes lumineuses. Ce n'était pas là ma pensée. Je voulais dire que la ligne de force magnétique était éclairée, comme la terre est éclairée par le soleil, ou un réticule par la lampe de l'astronome. En employant un rayon de lumière, nous pouvons déterminer par l'œil la direction des lignes magnétiques à travers un corps; et par l'allération du rayon et son effet optique sur l'œil, nous pouvons voir la forme de ces lignes, comme on voit la forme d'un fil de verre ou de tout autre corps transparent, rendu visible par la lumière : c'est là ce que je voulais dire par *éclaircissement*, et le mémoire le montre bien. — 15 décembre 1845.

» M. F. »

dance mutuelle, qu'elles peuvent être converties, pour ainsi dire, l'une dans l'autre, et qu'il existe dans leurs actions respectives des équivalences de pouvoir (1). Dans les temps modernes, les preuves de leur convertibilité ont été accumulées en nombre considérable, et l'on a fait un commencement de détermination de leurs forces équivalentes.

» Cette forte conviction s'étendait aux pouvoirs de la lumière, et m'avait conduit précédemment à plusieurs tentatives pour découvrir la relation directe de la lumière et de l'électricité, et leur action mutuelle dans les corps soumis à la fois à ces deux pouvoirs ; mais les résultats furent négatifs, et plus tard furent confirmés dans ce sens par Wartmann.

» Ces essais infructueux, ainsi que bien d'autres qui n'ont jamais été publiés, ne purent cependant détruire ma forte conviction tirée de considérations philosophiques : aussi ai-je repris récemment cette recherche par des expériences du caractère le plus exact et le plus pénétrant, et j'ai à la fin réussi à *magnétiser et à électriser un rayon de lumière, et à éclairer une ligne de force magnétique*. Ce sont ces résultats que, sans entrer dans le détail de bien des expériences sans succès, je vais décrire aussi brièvement et aussi clairement que je pourrai. »

DISPOSITION DES EXPÉRIENCES

« Un rayon de lumière, émis par une lampe d'Argand, est polarisé dans un plan horizontal par réflexion à la surface d'un miroir ; le rayon polarisé traverse un Nicol analyseur, mobile autour d'un axe horizontal, au moyen du-

(1) *Exp. Res.*, 57, 366, 376, 877, 961, 2071.

quel il peut être examiné commodément. Entre le miroir polarisateur et l'analyseur sont disposés deux pôles électromagnétiques puissants, soit les pôles d'un électro-aimant en fer à cheval, soit les pôles de nom contraire de deux électro-aimants cylindriques. Ces pôles sont séparés par une distance d'environ deux pouces (5°,08) dans la direction du rayon lumineux ; ils sont placés de façon que, s'ils sont d'un même côté du rayon polarisé, ils en soient voisins ; et que, s'ils sont de part et d'autre, le rayon passe entre eux dans une direction toujours parallèle, ou à peu près, aux lignes de force magnétique. De cette manière, une substance transparente quelconque, mise entre les pôles, sera traversée à la fois et dans la même direction par le rayon polarisé et les lignes de force magnétique.

» Une lame carrée de verre pesant de deux pouces (5°,08) environ de côté, d'un demi-pouce (1°,27) d'épaisseur, à faces planes et polies, est placée entre les deux pôles (que le courant électrique ne rend pas encore magnétiques) de façon que le rayon polarisé la traverse dans sa longueur. Le verre se comporte alors comme l'air, l'eau ou toute autre substance inactive : si l'analyseur a été amené préalablement dans une position où il y a extinction du rayon polarisé, ou, plutôt, où l'image produite par ce rayon est rendue invisible, l'introduction du verre n'apporte aucune modification à cet état de choses. Développons maintenant la force de l'électro-aimant en envoyant le courant électrique dans ses bobines : *aussitôt l'image de la flamme de la lampe devient visible, et reste visible tant que le système continue à être magnétiqué.* Si, en arrêtant le courant, on fait cesser la force magnétique, la lumière disparaît aussitôt ; ces phénomènes peuvent être reproduits à volonté, à un moment quelconque, en toute circonstance,

et montrent une dépendance parfaite de cause à effet. Le courant voltaïque, dont on a fait usage dans cette occasion, était celui de cinq couples de Grove ; les électro-aimants étaient assez puissants pour que chaque pôle pût porter un poids de 28 à 56 livres, (13 à 26 kilogr.) et plus. Une personne, qui examinerait le phénomène pour la première fois, ne parviendrait pas à le voir avec un aimant faible.

» La force qui s'exerce alors sur le verre est caractérisée par une rotation ; car, lorsque la lumière a été ainsi rendue visible, on peut produire l'extinction en tournant l'analyseur à droite ou à gauche d'un angle plus ou moins grand ; et si l'on continue de mouvoir l'analyseur d'un côté ou de l'autre de cette position, la lumière reparaît et prend des teintes complémentaires, suivant que ce dernier mouvement est à droite ou à gauche.

» Quand le pôle le plus voisin de l'observateur est un pôle marqué, c'est-à-dire de la même espèce que le pôle se tournant vers le nord dans une aiguille aimantée, et que le pôle le plus éloigné est un pôle non marqué, la rotation du rayon est à gauche (1) ; car c'est à gauche, ou en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, qu'il faut tourner l'analyseur pour retrouver le rayon et ramener l'image à son état primitif. Quand les pôles sont renversés, ce qui se fait instantanément en renversant le sens du courant électrique, la rotation change aussi de sens et se fait vers la droite, et le changement est de même grandeur que précédemment. Le sens est toujours le même pour la même *ligne de force magnétique*.

» Quand le diamagnétique est placé dans une autre des nombreuses positions, qu'il est aisé de concevoir autour

(1) J'ai corrigé ce qui est évidemment une erreur accidentelle sur le sens de la rotation, tel que l'indique le mémoire de Faraday.

des pôles magnétiques, on obtient des résultats plus ou moins marqués comme grandeur, mais d'un caractère bien net, et les phénomènes que l'on vient de décrire peuvent en être regardés comme le principal exemple.

» Les mêmes phénomènes ont été observés sur le borosilicate de plomb (verre pesant) au moyen d'un bon aimant permanent, en fer à cheval, en acier, de grosseur ordinaire, sans employer de courant électrique. Les résultats étaient faibles, mais suffisants pour montrer la parfaite identité d'action des électro-aimants et des aimants ordinaires, en ce qui concerne leur pouvoir sur la lumière.

» Deux pôles magnétiques furent employés bout à bout ; les noyaux des électro-aimants étaient des cylindres de fer creux et le rayon de lumière polarisée passait suivant leur axe à travers le diamagnétique placé entre eux : l'effet était le même.

» On a aussi employé un seul pôle magnétique, l'extrémité d'un fort électro-aimant cylindrique. Quand le verre pesant était au delà de l'aimant, près de lui, mais entre l'aimant et le polariseur, la rotation se faisait dans un sens qui dépendait de la nature du pôle ; quand le verre était en deçà de l'aimant, près de lui, mais entre l'aimant et l'œil, la rotation, pour le même pôle, était en sens inverse de ce qu'elle était précédemment ; et quand on prenait un pôle d'aimantation contraire, on renversait en même temps ces deux directions. Si le verre pesant est placé dans une position correspondant au pôle, mais en dessus ou en dessous, de façon que les *courbes magnétiques* ne traversent plus le verre dans une direction parallèle, mais plutôt perpendiculaire au rayon polarisé, il n'y a plus d'effet produit. On comprendra ces détails en se reportant à la figure 351, où *a* et *b* représentent les premières positions

du diamagnétique, *c* et *d* les dernières, la direction du rayon étant figurée par la ligne pointillée. Si le verre est placé exactement au bout de l'aimant, il n'y a pas non plus d'effet produit par un rayon passant dans la direction figurée, quoique des explications précédentes il résulte clairement qu'un rayon passant *parallèlement* aux lignes magnétiques dans un verre ainsi placé devrait être influencé.

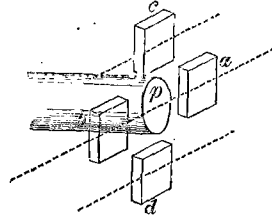


FIG. 351.

» Ainsi, les lignes magnétiques qui traversent du borosilicate de plomb, et un grand nombre d'autres substances, donnent à ces corps le pouvoir d'agir sur la lumière polarisée, lorsque ces lignes sont parallèles au rayon, ou, du moins, un pouvoir en proportion de leur degré de parallélisme. Si elles sont perpendiculaires au rayon, elles n'ont pas d'action sur lui. (Faraday appelle « diamagnétiques » le verre et d'autres substances.) Elles donnent au diamagnétique le pouvoir rotatoire, et la loi de cette action sur la lumière est la suivante : Si une ligne de force magnétique *part* d'un pôle sud « ou pôle non marqué » ou bien *arrive* d'un pôle nord « ou pôle marqué » le long de la trajectoire d'un rayon polarisé arrivant à l'observateur, elle produit la rotation à droite; et si une pareille ligne arrive d'un pôle sud, ou part d'un pôle tournant vers le nord, elle produit la rotation à gauche (1).

» Si un bouchon ou un cylindre de verre représentant le diamagnétique (fig. 352) est marqué à ses extrémités

(1) [Les expressions *partir* et *arriver* se rapportent à l'observateur : le pôle d'où *part* la ligne de force est le pôle voisin de l'observateur, et le pôle d'où elle *arrive* est le pôle éloigné de lui.]

des lettres N et S, pour indiquer la direction que prendraient les pôles de l'aimant s'il était suspendu, la ligne qui joint ces lettres peut être regardée comme une ligne de force magnétique. Et si l'on trace autour du cylindre une ligne avec une tête de flèche pour indiquer sa direction, ce simple modèle tenu devant les yeux représentera

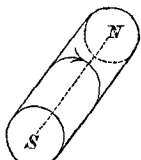


FIG. 352.

toute la loi, et donnera pour chaque position la direction qui en résulte. Si l'on considère une montre comme étant le diamagnétique, et si l'on suppose que le pôle sud d'un aimant soit appliqué contre le cadran, et le pôle nord contre le dos de la montre, le mouvement des aiguilles indique le sens de la rotation que subit un rayon de lumière par le fait de l'aimantation. »

Le moyen le plus simple de se rappeler le sens de cette rotation est peut-être de remarquer que : *dans tout milieu diamagnétique, la rotation du plan de polarisation s'effectue dans le sens que doit avoir un courant circulant autour du rayon pour produire le magnétisme existant.*

Faraday passa ensuite « aux différentes circonstances qui affectent, limitent et définissent dans son étendue et dans sa nature ce pouvoir nouveau d'agir sur la lumière.

En premier lieu, la rotation paraît proportionnelle à la longueur de diamagnétique traversée par le rayon et les lignes de force magnétique. Que l'on augmente ou diminue le morceau de verre pesant *parallèlement* au chemin que suit le rayon, il n'en résulte aucune différence dans l'effet de la partie traversée par le rayon.

» Le pouvoir rotatoire *augmente* avec l'intensité des lignes de force magnétique, et paraît être proportionnel à l'intensité de la force magnétique.

» D'autres substances que le verre pesant possèdent la même propriété d'agir sur la lumière, sous l'influence de la force magnétique. Si ces substances ont un pouvoir rotatoire propre, comme c'est le cas pour la térébenthine, le sucre, l'acide tartrique et les tartrates, etc., l'effet de la force magnétique s'ajoute ou se retranche de ce pouvoir spécifique, suivant que la rotation naturelle et celle induite par le magnétisme sont vers la droite ou vers la gauche. »

Faraday remarqua qu'il n'a pu observer aucun changement dans ce pouvoir en communiquant un mouvement quelconque au diamagnétique, pendant qu'il était soumis à l'action simultanée de la lumière et du magnétisme.

« Les hélices magnétisées, sans leur noyau de fer, avaient un pouvoir très faible, et leurs effets étaient à peine sensibles. Avec les noyaux de fer, leur action était très énergique, quoiqu'il ne passât pas dans les bobines plus d'électricité qu'auparavant. Cela montre, d'une manière bien simple, que les phénomènes que présente la lumière dans ces circonstances, sont en relation directe avec la forme magnétique de la force mise en jeu par cette disposition. Un autre effet observé éclaircit le même point. Quand on établit le contact avec la pile voltaïque, et que le courant circule autour de l'électro-aimant, l'image produite par la rotation du rayon polarisé n'atteint pas immédiatement tout son éclat, mais croît pendant un couple de secondes et acquiert graduellement son maximum d'intensité; lorsqu'on rompt le contact, l'image tombe immédiatement et semble disparaître tout d'un coup. L'accroissement graduel de l'éclat est dû au *temps* qu'exige le noyau de fer pour développer toute la puissance magnétique dont le courant électrique le rend susceptible; et tant que le magnétisme augmente d'intensité, l'énergie de son effet sur la lumière

augmente également : d'où il résulte que la rotation s'effectue progressivement. »

Faraday ne put observer « dans le verre pesant, quand il est dans cet état, c'est-à-dire traversé par des lignes de force magnétique, aucun indice d'augmentation de l'action inductive magnétique ou l'existence d'une action magnéto-inductive spécifique d'une nature déterminée. » Il « plaça de grandes quantités de ce verre, dans différentes positions, entre des aimants et des aiguilles aimantées, et quoiqu'il disposât de moyens très délicats pour apprécier toute différence entre ce verre et l'air, il n'en put observer aucune. »

« En employant de l'eau, de l'alcool, du mercure et d'autres liquides contenus dans de grands vases minces, en forme de thermomètres, » il « ne put découvrir aucune différence de volume, lorsque ces vases étaient traversés par les courbes magnétiques. »

Faraday reconnut que bien d'autres substances que le verre pesant jouissent du pouvoir rotatoire sous l'influence d'un aimant.

Les cristaux ne donnent en général qu'un petit effet.

LIQUIDES

Faraday trouva que le phénomène se manifestait à un degré plus ou moins considérable dans tous les liquides qu'il essaya.

GAZ

Faraday ne réussit pas à obtenir d'effet avec les gaz.

CORPS AYANT UN POUVOIR ROTATOIRE NATUREL

Dans les corps qui avaient préalablement un pouvoir rotatoire naturel, la rotation magnétique induite suit la loi

générale; et ne dépend en rien des propriétés antérieures du corps.

ACTION DES COURANTS ÉLECTRIQUES SUR LA LUMIÈRE

Faraday trouva, comme on devait s'y attendre, que l'action d'un courant électrique était la même que celle de son aimant équivalent, ou que, si une substance ayant un pouvoir rotatoire magnétique est placée à l'intérieur d'une hélice, un rayon de lumière qui traverse cette substance le long de l'hélice éprouve une rotation quand le courant passe; le sens de cette rotation dépend du sens du courant. Dans ce cas, la lumière n'apparaît pas graduellement, mais d'une façon instantanée.

Les solides avaient la forme de longues tiges à bouts polis, placées à l'intérieur de l'hélice. Les liquides étaient contenus dans des tubes de verre terminés par des glaces plates.

LOI DU PHÉNOMÈNE

Dans toutes les substances qu'il étudia, Faraday trouva que la rotation du plan de polarisation avait lieu dans le sens où le courant tourne dans l'hélice.

En substituant à l'hélice son aimant équivalent, on voit que cette loi est d'accord avec la loi sur le sens de la rotation produite par un aimant.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Voici les conclusions générales de Faraday :

« Ainsi se trouvent établies, pour la première fois, je crois, une relation et une dépendance vraiment directes entre la lumière et les forces magnétiques et électriques; ainsi vient s'ajouter un fait important aux faits et aux con-

sidérations qui tendent à prouver que toutes les forces naturelles sont liées les unes aux autres et ont une commune origine. Il est sans doute difficile, en l'état actuel de nos connaissances, d'exprimer en termes précis ce que nous attendons. Je viens de dire qu'une des forces de la nature est, dans ces expériences, directement reliée aux autres; j'aurais peut-être dû dire qu'une des formes du grand pouvoir de la nature y est distinctement et directement reliée à d'autres formes; ou que ce grand pouvoir, qui se manifeste par des phénomènes particuliers sous des formes particulières, révèle une fois de plus son identité et se fait encore reconnaître par la relation directe établie entre sa forme lumière et ses formes électricité et magnétisme.

» La relation qui existe entre la lumière *polarisée* d'une part, le magnétisme et l'électricité de l'autre, est plus intéressante encore que si son existence avait été établie pour la lumière ordinaire seulement. Elle ne peut que s'étendre à la lumière ordinaire; et comme elle s'applique à une lumière rendue, à certains égards, plus précise dans son caractère et ses propriétés par la polarisation, elle la compare et la relie avec ces forces, dans cette qualité de caractère qu'elles possèdent, et nous ouvre des vues qui nous manquaient jusqu'à présent pour appliquer ces forces à l'étude de la nature de cet agent radiant et des autres radiations.

» Revenant sur la distinction conventionnelle faite précédemment, on peut encore constater que ce sont *seulement* les lignes de force magnétique qui agissent sur les rayons lumineux, et qu'elles *n'agissent*, au moins en apparence; que si elles sont parallèles au rayon lumineux ou si elles tendent à lui être parallèles. De même que, en ce qui

concerne la matière qui n'est pas magnétique à la façon du fer, les phénomènes d'induction électrique et d'électrolyse montrent que les forces électriques agissent avec une énergie bien supérieure à celle des forces magnétiques; de même ici, dans un autre ordre de phénomènes et pour les effets particuliers appartenant spécialement aux forces magnétiques, ces dernières montrent à leur tour qu'elles possèdent une grande supériorité et qu'elles ont sur la même espèce de matière leur équivalence complète d'action.

» Les forces magnétiques n'agissent pas sur le rayon lumineux directement et sans intervention de la matière, mais par l'intermédiaire de la substance dans laquelle elles se trouvent exister simultanément avec le rayon; les substances et les forces se donnant l'une à l'autre et recevant l'une de l'autre le pouvoir d'agir sur la lumière. C'est ce que démontre l'absence d'action que l'on constate dans le vide, ou dans l'air ou dans les gaz: c'est ce qui résulte encore du degré variable auquel les différentes matières possèdent cette propriété. Que les forces magnétiques agissent sur un rayon lumineux toujours de la même manière et dans le même sens (1), indépendamment des différentes variétés des substances, ou de leur état solide ou liquide, ou de leur pouvoir rotatoire spécifique, cela prouve qu'il y a une relation directe entre la force magnétique et la lumière; mais le fait que les substances sont nécessaires et qu'elles agissent à des degrés divers, prouve que le magnétisme et la lumière agissent l'un sur l'autre par l'intermédiaire de la matière.

(1) Verdet a prouvé depuis qu'il n'en est pas ainsi: les substances paramagnétiques produisent la rotation en sens inverse des diamagnétiques. (Voy. plus loin.)

» Ne connaissant ou ne percevant la *matière* que par ses propriétés et n'ayant aucune notion d'un nucléus imaginaire, abstrait de l'idée de ces propriétés, les phénomènes décrits dans ce mémoire ont affermi beaucoup la tendance que j'avais à me fier aux idées que j'ai émises dans une précédente occasion sur sa nature (1).

» On ne peut douter que les forces magnétiques n'agissent, pour modifier la constitution intérieure du diamagnétique, aussi librement dans l'obscurité que lorsqu'un rayon de lumière traverse ce diamagnétique, bien que les phénomènes produits par la lumière semblent, pour l'instant, donner les seuls moyens d'observer cette constitution et ses changements. De plus, un tel changement doit se produire aussi dans les corps opaques, comme le bois, la pierre, ou le métal ; car, en tant que diamagnétiques, il n'y a pas de différence entre ces corps et ceux qui sont transparents. Tout au plus le degré de transparence peut-il faire, sous ce rapport, une distinction entre les individus d'une classe.

» Si les forces magnétiques avaient fait de ces corps des aimants, on aurait pu examiner au moyen de la lumière un aimant transparent, ce qui nous eût été d'un grand secours pour l'étude des forces de la matière. Mais elles n'en font pas des aimants (2), et par suite la condition moléculaire de ces corps, lorsqu'ils sont dans l'état que l'on a décrit, doit présenter une différence spécifique avec celle du fer aimanté ou de toute autre matière du même genre : ce doit être *un état magnétique nouveau*. Et, comme cet état est un état de tension, ainsi que le montre le retour instantané à l'état normal dès que l'on éloigne l'induction magné-

(1) *Exp. Res.*, vol. II, p. 284; *Phil. Mag.*, 1844, vol. XXIV, p. 136.

(2) On a démontré depuis qu'elles les rendent diamagnétiques. (Voy. vol. II, p. 62, Tyndall, *Sur la polarité diamagnétique*.)

tique, la *force* que possède la matière dans cet état doit être une *force magnétique nouvelle*, un *nouveau mode d'action* de la matière.

« Car il est impossible, je crois, de voir les forces magnétiques agir avec une intensité croissante sur un morceau de verre pesant ou sur un tube plein d'eau, sans comprendre que ces corps acquièrent des propriétés qui, non seulement sont *nouvelles* pour eux, mais qui sont aussi soumises à des lois précises et définies et qui sont la représentation équivalente des forces qui les ont produites.

« Peut-être cet état est-il un *état de tension électrique tendant à produire un courant*; comme dans les aimants, suivant la théorie d'Ampère, l'état est un état de *courant*. Quand un noyau de fer est mis dans une hélice, tout nous porte à croire que des courants électriques y sont produits, qui tournent et se meuvent dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'hélice. Si un diamagnétique est mis à la même place, il acquiert la propriété de faire tourner le rayon lumineux dans le même plan. L'état qui lui a été communiqué est un état de tension, mais il ne se traduit pas par des courants, quoique la force agissante et les autres circonstances soient les mêmes que celles qui produisent des courants dans le fer, le nickel, le cobalt et les autres substances du même genre lorsqu'elles sont disposées pour les recevoir. Dès lors, l'idée que, dans ces circonstances, il y a dans les diamagnétiques une tendance à la production de courants, est d'accord avec tous les phénomènes décrits jusqu'à présent; elle est encore confirmée par ce fait que si on laisse sans modification aucune une pierre d'aimant ou un courant électrique, qui par induction rendent magnétiques du fer, du nickel ou du cobalt, on enlève à ces corps par un simple changement de température leur pro-

priété spéciale, et on les fait rentrer dans la classe des diamagnétiques. »

RECHERCHES ULTÉRIEURES

[La question fut ensuite étudiée dès 1846, par M. Edmond Becquerel (*Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XVII, p. 437 et t. XXVIII, p. 334), qui établit que la rotation magnétique des rayons lumineux de diverses couleurs traversant un milieu diamagnétique se fait approximativement en raison inverse du carré de la longueur d'onde, et signala entre autres les propriétés curieuses des dissolutions des sels de fer.] En 1851, M. Wiedemann expérimenta sur des liquides soumis à l'action directe des courants électriques circulant dans une hélice ; il observa que la rotation du plan de polarisation était proportionnelle à l'intensité du courant.

[Il convient également de citer les noms de MM. Bertin (*Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXIII, p. 5), Matteucci (*id.*, t. XXVIII, p. 493), Edlund, Wertheim (*id.*, t. XL, p. 207) et de la Rive (*id.*, 4^e série, t. XV, p. 57 et t. XXII, p. 5).]

EXPÉRIENCES DE VERDET

En 1852, Verdet commença à étudier la question : c'est lui qui le premier effectua des mesures quantitatives par l'emploi de forces magnétiques puissantes. Dans la plupart de ses expériences, il se servait d'un électro-

(1) *Œuvres de Verdet*, tome I, p. 112, Paris, Masson, 1872. Tous les extraits des écrits de Verdet sont tirés de l'édition de ses œuvres complètes, publiée par ses élèves de 1872 à 1875. On a trouvé plus commode de renvoyer aux œuvres complètes plutôt qu'aux recueils où ses mémoires ont été publiés primitivement. Les figures sont empruntées à cette édition des œuvres de Verdet.

aimant à noyaux de fer dont les pôles étaient perforés, ce qui permettait de faire passer un rayon de lumière le long de la ligne de force magnétique maximum. Dans ses premières recherches, les cylindres de fer formant les noyaux de l'électro-aimant étaient percés d'un canal suivant leur axe.

La figure 353 montre la disposition de l'appareil de M. Verdet.

Les cylindres AB et A'B' étant placés avec leurs axes sur

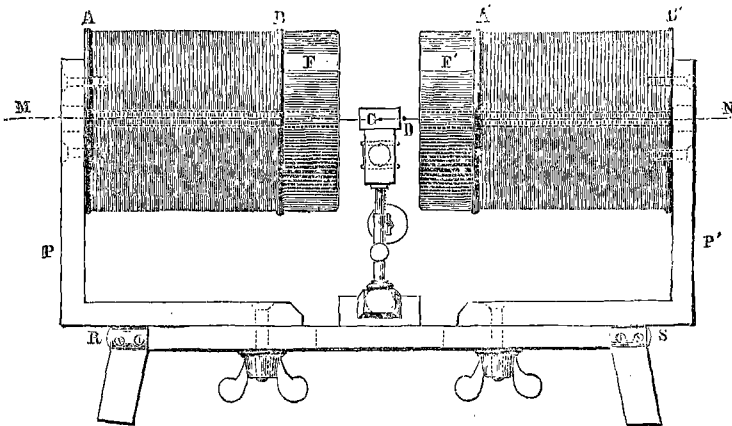


FIG. 353.

une même ligne droite horizontale, on pouvait envoyer un rayon de lumière à travers les bobines et à travers un morceau de verre ou de tout autre milieu transparent placé dans le petit espace laissé libre entre les bouts voisins des cylindres. Les bouts extérieurs sont reliés par une tige massive de fer doux PRSP' recourbée suivant trois côtés d'un rectangle.

Il est très important, comme on le verra de suite, que le verre et l'espace dans son voisinage immédiat soient conte-

nus dans un champ de force magnétique uniforme : aussi a-t-on placé sur les extrémités des bobines qui se font face d'épais disques de fer F, F' , percés au centre.

MESURE DE L'INTENSITÉ DU CHAMP MAGNÉTIQUE

Ayant préparé un champ de force magnétique sensiblement uniforme dans un espace considérable, Verdet y introduit, à côté du corps transparent sur lequel il expérimente, l'appareil CD dont il se servait pour déterminer l'intensité du champ.

La théorie de cet instrument est fondée sur ce fait que le courant total ou l'intégrale du courant dû au mouvement d'un fil donné dans un champ magnétique (ce courant étant mesuré par l'écart extrême de l'aiguille du galvanomètre dans sa première oscillation) ne dépend que de l'intensité du champ magnétique et de la grandeur du déplacement total, mais ne dépend pas de la vitesse du mouvement, quand cette vitesse est considérable.

On prend une petite bobine de fil recouvert de soie C (fig. 354) et on la fixe de façon qu'au moyen du bouton B on puisse la faire tourner de 90 degrés autour d'un axe FG perpendiculaire à l'axe de la bobine.

La bobine avait 28 millimètres de diamètre extérieur, 12 de diamètre intérieur et 15 de hauteur; elle était montée sur un petit support de cuivre disposé au milieu de l'intervalle des pôles, de façon que la ligne autour de laquelle elle pouvait tourner fût bien perpendiculaire à la ligne des pôles en son milieu. Le bouton D permettait d'élever ou d'abaisser la bobine; la vis H, de la fixer.

Quand on faisait tourner la bobine, son axe passait de la position verticale à l'horizontale, et réciproquement. Pendant que le courant passait dans les bobines de l'aimant,

et que l'on observait les effets optiques, un aide tournait subitement la bobine de 90 degrés et on observait l'élongation de l'aiguille du galvanomètre. Naturellement il y avait un arrêt pour limiter le mouvement de la bobine à 90 degrés exactement. L'élongation de l'aiguille du galva-

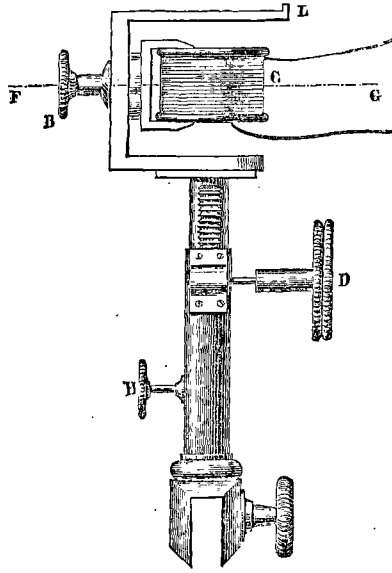


FIG. 354.

nomètre est alors une mesure exacte de l'intensité de la force magnétique à laquelle est soumis le corps transparent, mesure en unités purement arbitraires, il est vrai, mais dont les résultats sont, pour une même disposition des appareils, parfaitement comparables. Si Verdet avait enlevé son aimant et fait tourner sa bobine sous la seule influence de la force magnétique terrestre, à un moment où l'intensité de cette force était connue, il aurait immédiatement ramené ses mesures aux unités absolues. Mais

à cette époque, l'importance des mesures absolues n'était guère reconnue, si tant est qu'elle le fût, et il ne fit pas cette observation.

Verdet fit des expériences sur le verre pesant de Faraday, sur le flint-glass commun et sur le sulfure de carbone. Les dimensions des échantillons de verre pesant qu'il employait étaient : 1° Un parallépipède à base carrée, de 40 millimètres de long sur 13 millimètres de côté, poli sur ses deux bases et sur deux faces latérales opposées; 2° Un parallépipède rectangle de 37^{mm},2, sur 26^{mm} et 12^{mm},5, poli sur les six faces.

Le flint était un parallépipède de 43^{mm},3 de long, de 14^{mm},5 de côté, poli sur les deux bases et sur deux faces latérales. En envoyant la lumière à travers les échantillons suivant leur longueur ou par côté, on pouvait lui faire traverser différentes longueurs de verre. Le sulfure de carbone était contenu dans l'un ou l'autre de deux tubes fermés par des glaces et ayant respectivement pour longueurs 44 et 37 millimètres. Quelques expériences préliminaires avaient montré que l'action des lames de verre qui formaient les bouts des tubes était tout à fait insensible.

ROTATION ET FORCE MAGNÉTIQUE

La loi que Verdet a déduite de ses premières expériences est ainsi conçue :

La rotation du plan de polarisation est proportionnelle à la force de l'action magnétique; c'est-à-dire que si nous divisons la grandeur de la rotation, observée dans une expérience quelconque, par l'intensité du champ magnétique, observée au galvanomètre dans la même expérience, nous trouverons que, pour la même substance, la même couleur, et la même disposition de l'appareil, le quotient

est constant, quelle que soit l'intensité du courant employé.

Le tableau suivant est pris parmi un grand nombre d'autres semblables donnés par Verdet, pour mettre le lecteur en mesure de juger par lui-même de la rigueur apportée à cette étude.

EXPÉRIENCES SUR LE VERRE PESANT N° 2 (1) — 3^e SÉRIE

Lumière blanche. Épaisseur, 37^{mm}2.

F	R	Q
148,25	6° 55' 15''	2,80
116,37	5° 28'	2,82
107,00	5° 9' 30''	2,89
92,87	4° 26'	2,84
89,37	4° 20'	2,91
83,50	4° 4' 20''	2,93
59,37	2° 57' 15''	2,98
	Moyenne.....	2,88

Dans ces expériences, R est le double de la rotation produite par le courant, c'est-à-dire la différence des lectures du cercle correspondant aux deux sens du courant. F est l'intensité du champ magnétique, mesurée par l'appareil d'induction. Q est égal au rapport de la rotation R à la force F qui l'a produite. Nous voyons que les diverses valeurs de Q sont presque absolument constantes. Tous les perfectionnements ultérieurs dans les expériences ont établi entre ces différentes valeurs un accord de plus en plus parfait. Des expériences sur de la lumière homogène donnent des résultats bien plus certains que celles avec la lumière blanche, car, deux couleurs n'éprouvant pas des rotations égales sous l'influence de la même force magnétique, la rotation de la lumière blanche représente

(1) Verdet, tome I, p. 137.

uniquement la rotation moyenne ou celle de la couleur prédominante parmi celles qui composent la lumière blanche. Un changement accidentel de la couleur du milieu, même très faible, peut altérer considérablement la rotation moyenne, en changeant la couleur sur laquelle on observe l'effet principal.

Verdet dit que cette loi se vérifie, quelles que soient la position des pôles de l'aimant et leurs distances au verre.

ÉPAISSEUR DU MILIEU

Les expériences suivantes portaient sur l'effet de l'épaisseur du milieu traversé : il trouva que *pour la même intensité magnétique, la rotation est proportionnelle à l'épaisseur de verre traversée par la lumière*. Dans les expériences, il n'était pas possible d'obtenir la même intensité magnétique pour deux épaisseurs différentes de verre ; mais il est clair que, si la loi précédente subsiste, le rapport Q de la rotation à l'intensité magnétique doit être proportionnel à l'épaisseur du verre.

Dans deux des expériences citées par Verdet, on a, avec du verre pesant,

$$Q = \frac{R}{I} = 2,88 \text{ et } 1,92,$$

les épaisseurs traversées étant respectivement 37,2 et 26 millimètres. Divisant les quotients précédents par les épaisseurs correspondantes, on trouve les quotients 0,077 et 0,074. Un calcul identique pour des expériences faites sur le sulfure de carbone donne les quotients 0,056 et 0,055. Dans les deux cas, l'accord est aussi complet que l'on pouvait raisonnablement l'attendre des conditions de l'expérience.

ANGLE DES DIRECTIONS DE LA LUMIÈRE ET DE LA FORCE
MAGNÉTIQUE

Le point qui fut ensuite étudié est l'effet, de l'inclinaison de la lumière sur la direction de la force magnétique. L'appareil employé à cet effet est représenté en plan sur la fig. 355.

Le verre et les Nicols étant fixés de manière que la lumière se propageât suivant une horizontale, l'aimant était disposé de façon à pouvoir tourner autour d'un axe vertical; on amenait ainsi la ligne de force magnétique à être horizontale et à faire avec la direction de la lumière tel angle qu'on voulait. A cet effet, on employait un aimant en fer à cheval, de forme ordinaire, figuré en plan sur la fig. 355;

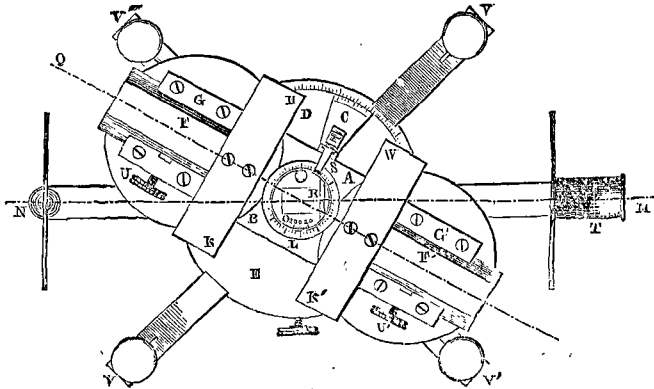


FIG. 355.

ses bobines étaient verticales et ses pôles étaient formés de pièces massives de fer HK , WK' , fixées à leurs noyaux. Des fentes horizontales, percées dans ces pièces polaires de fer, laissaient passer la lumière, même quand l'angle de sa direction et de la ligne axiale de l'aimant était considérable.

N est le polariseur, TM l'analyseur ; L et D sont des cercles divisés, au moyen desquels on peut mesurer l'angle de la lumière et de l'axe magnétique. D se lit au moyen du vernier C. F et F' sont des glissières pour modifier la distance des pôles ; elles sont mobiles dans des guides GG', dans lesquels on peut les fixer par les vis U et U'. VV' sont des vis calantes. La loi, déduite des expériences faites avec cet appareil, est la suivante :

La rotation produite par une intensité de champ magnétique donnée est simplement proportionnelle au cosinus de l'angle compris entre la direction du rayon de lumière et la direction de la ligne de force magnétique ; c'est-à-dire proportionnelle à la projection, sur la ligne des pôles, de la longueur du milieu traversée par la lumière.

En combinant ces trois résultats, on arrive à la loi générale simple qui suit.

LOI GÉNÉRALE

Pour un milieu et une couleur donnés, la rotation du plan de polarisation, entre deux points quelconques de la trajectoire du rayon, est proportionnelle à la différence de potentiel-magnétique en ces deux points.

Car, la différence de potentiel en deux points d'une substance magnétique ne dépend que de trois éléments.

Elle est proportionnelle : 1° à l'intensité d'aimantation de la substance ;

2° Au cosinus de l'angle compris entre la direction d'aimantation et la ligne joignant les deux points ;

3° A la distance des deux points.

RÉSUMÉ DE MAXWELL

Le professeur Clerk Maxwell résume ainsi les travaux de Faraday et de Verdet (1):

« Art 808. — L'angle dont tourne le plan de polarisation est proportionnel :

» 1° Au chemin parcouru par le rayon dans le milieu : le plan de polarisation change donc d'une façon continue de sa position d'incidence à sa position d'émergence.

» 2° A l'intensité de la composante de la force magnétique suivant la direction du rayon.

» 3° La grandeur de la rotation dépend de la nature du milieu. On n'a pas encore observé de rotation quand le milieu était de l'air ou un autre gaz (2).

» Ces trois points sont compris dans l'énoncé plus général que la rotation angulaire est numériquement égale à l'accroissement du potentiel magnétique depuis le point où le rayon pénètre dans le milieu jusqu'au point où il en sort, multiplié par un coefficient, qui, pour les milieux diamagnétiques, est généralement positif.

» Art. 809. — Dans les substances diamagnétiques, le sens dans lequel se produit la rotation du plan de polarisation est le même que celui dans lequel un courant positif devrait circuler autour du rayon pour produire une force magnétique de même sens que celle qui existe actuellement dans le milieu. »

L'auteur de ce livre s'est occupé, pendant près de deux ans, sous la direction du professeur Maxwell, de la détermination du coefficient dont il est question à la dernière ligne de l'art. 808, c'est-à-dire de la « détermination en

(1) *Electricity*, art. 808, vol. II, p. 400.

(2) Voy. plus loin les travaux récents sur ce sujet.

unités absolues de la constante de Verdet. » On trouvera plus loin le détail des expériences.

MILIEUX DIFFÉRENTS

On a trouvé que la grandeur de la rotation, produite par une force magnétique donnée sur un rayon de couleur donnée, varie avec la nature du milieu transparent, c'est-à-dire que le coefficient mentionné à la fin de l'art. 808 de Maxwell a différentes valeurs pour les différents milieux. Ainsi que le dit Maxwell, pour les substances diamagnétiques il est généralement positif; mais il est négatif pour beaucoup de milieux ferro-magnétiques. Verdet, dans le mémoire qui commence à la page 163, vol. I de ses œuvres, a étudié ce qu'il appelle le « Pouvoir rotatoire magnétique » d'un grand nombre de substances: c'est-à-dire qu'il a trouvé une série de valeurs du coefficient mentionné à l'art. 808 de Maxwell, valeurs rapportées au coefficient pour l'eau distillée, pris arbitrairement comme unité. Comme il est impossible de se procurer des échantillons de substances cristallisées et de sels, qui n'agissent pas naturellement sur la lumière polarisée, toutes les expériences sur les substances de ce genre ont été faites sur des solutions, et principalement des dissolutions aqueuses. Il a trouvé que :

Lorsqu'un milieu parfaitement homogène (comme un liquide) est un mélange de deux ou plusieurs substances qui n'exercent pas de réactions chimiques mutuelles, le pouvoir rotatoire magnétique du mélange est égal à la somme algébrique des pouvoirs rotatoires magnétiques de ses éléments, l'action de chaque élément étant proportionnelle à la quantité de cet élément qui existe dans la dissolution.

Dans les premières expériences, cette loi avait été masquée, parce que l'observateur ne s'était pas souvenu qu'un kilogramme d'une dissolution aqueuse ne contient généralement pas un kilogramme d'eau. Si, par exemple, on dissout un kilogramme de sel dans 100 kilogrammes d'eau, 100 kilogrammes de la dissolution ne contiendront qu'un peu plus de 99 kilogrammes d'eau. D'ailleurs Verdet remarqua presque aussitôt la nécessité de cette correction, et, quand il l'eut faite, les résultats de ses expériences vérifièrent la loi précédente aussi exactement qu'on pouvait le désirer.

Plusieurs physiciens, en particulier M. Bertin, ont essayé d'établir une relation entre le pouvoir rotatoire magnétique des substances et leur indice de réfraction ; mais, au moment où ont été publiées les œuvres de Verdet, on ne pouvait dire qu'aucune relation de ce genre fût établie (1).

Un exemple intéressant de l'action combinée de deux corps, dont les pouvoirs rotatoires magnétiques sont de signes contraires, est fourni par la dissolution aqueuse de perchlorure de fer. Verdet dit à ce sujet : « Une dissolution aqueuse très étendue de ce sel a un pouvoir rotatoire magnétique plus faible que celui de l'eau : à mesure que l'on concentre la dissolution, ce pouvoir rotatoire diminue, se réduit à zéro, et finit par changer de signe ; après le changement de signe, il augmente jusqu'au maximum de concentration. Ainsi une solution voisine de ce maximum, qui contient 40 pour 100 de perchlorure, exerce sur la lumière polarisée une action contraire à celle de l'eau et six à sept fois plus grande. »

(1) Une relation a été trouvée en 1876 par M. H. Becquerel. Voy. plus loin.

Le tableau suivant donne les « pouvoirs rotatoires magnétiques » de différentes substances, celui de l'eau distillée étant pris pour unité (1).

Liquides.	Pouvoir rotatoire magnétique.
Eau distillée.....	1,000
Solution de borate de soude.....	1,000
— de chlorure de calcium.....	1,085
— de carbonate de potasse.....	1,050
— d'azotate de plomb.....	1,000
— de chlorure de magnésium.....	1,127
— de sel ammoniac.....	1,184
— de protochlorure d'étain.....	1,348
— de chlorure de zinc.....	1,344
— de sel ammoniac.....	1,371
— de carbonate de potasse.....	1,087
— de chlorure de calcium.....	1,230
— de protochlorure d'étain.....	1,525
— de chlorure de zinc.....	1,507
— de protochlorure d'étain.....	2,047
— d'azotate d'ammoniaque.....	0,908
Chlorure de carbone C ² Cl ⁴	1,264

Je crois qu'il eût mieux valu que Verdet prit pour terme de comparaison le sulfure de carbone de préférence à l'eau.

Mon expérience personnelle m'a montré que l'eau distillée est une substance bien peu convenable comme étalon, à cause de son pouvoir rotatoire très faible et de l'impossibilité où l'on est, non seulement de l'obtenir chimiquement pure, mais encore de se procurer deux échantillons renfermant les mêmes impuretés. Le sulfure de carbone convient bien mieux pour cet usage, parce qu'il est aisé de l'obtenir presque pur, et parce que, son pouvoir rotatoire étant très grand, l'action magnétique des

(1) Les liquides sont rangés suivant l'ordre croissant de leurs indices de réfraction, et Verdet concluait de ce tableau qu'il n'y a pas de relation simple entre les indices de réfraction et les pouvoirs rotatoires magnétiques.

impuretés qu'il renferme n'introduit qu'une très faible proportion pour cent d'erreur.

EFFET DE LA COULEUR DE LA LUMIÈRE SUR LA ROTATION
PRODUITE DANS UN MILIEU DONNÉ PAR UNE FORCE
MAGNÉTIQUE DONNÉE

Pendant quelque temps on a cru que, pour un milieu et une force magnétique donnés, les rotations variaient en raison inverse du carré de la longueur d'onde de la lumière. C'est M. Edmond Becquerel qui énonça le premier ce fait comme une loi.

Mais Verdet a montré que cette loi, bien qu'approchée, n'est pas rigoureusement vraie.

Le tableau suivant donne, pour diverses substances, les valeurs relatives des rotations correspondantes aux cinq raies C, D, E, F, G, de Fraunhofer; les rotations correspondantes à la raie E étant prises pour unité (1).

	C	D	E	F	G
Eau distillée	0,63	0,79	1,00	1,20	1,55
Dissolution de chlorure de calcium	0,61	0,80	1,00	1,19	1,54
— de chlorure de zinc	0,61	0,78	1,00	1,19	1,61
— de protochlorure d'étain	»	0,78	1,00	1,20	1,59
Essence d'amandes amères	0,61	0,78	1,00	1,21	»
Essence d'anis	0,58	0,75	1,00	1,25	»
Sulfure de carbone	0,60	0,77	1,00	1,22	1,65
Créosote (du commerce)	0,60	0,76	1,00	1,23	1,69
Essence de <i>Laurus cassia</i> (essence de canelle de Chine)	0,59	0,74	1,00	1,23	»
Moyenne	0,604	0,772	1,00	1,213	1,605

(1) Verdet, tome I, p. 206.

Or, la loi exacte de l'inverse carré des longueurs d'onde exigerait la série des rotations

C	D	E	F	G
0,64	0,80	1,00	1,08	1,50

On voit par ces chiffres que la rotation magnétique du plan de polarisation pour les différentes couleurs suit approximativement la loi de l'inverse carré des longueurs d'ondes.

La loi exacte du phénomène est toujours telle, que le produit de la rotation par le carré de la longueur d'onde croît d'une manière continue de l'extrémité la moins réfrangible à l'extrémité la plus réfrangible du spectre, du rouge au bleu. Les substances pour lesquelles cet accroissement est le plus sensible sont celles qui ont le plus grand pouvoir dispersif.

On a essayé plusieurs explications mathématiques de cette rotation, mais je ne sache pas qu'aucune d'elles s'accorde très exactement avec l'expérience.

Je vais maintenant passer à quelques détails sur la détermination que j'ai faite en unités absolues du pouvoir rotatoire magnétique du sulfure de carbone, c'est-à-dire du « coefficient » mentionné par Maxwell dans le passage cité, vol. II, p. 539.

CONSTANTE DE VERDET (1) (pl. LV)

Pour déterminer cette constante (Maxwell, art. 808), il était nécessaire de connaître, en mesure absolue, la différence de potentiel magnétique aux deux bouts d'une colonne de sulfure de carbone, différence correspondant à

(1) *Phil. Trans.*, 1877, 1^{re} partie, p. 7.

une certaine rotation du plan de polarisation, pour un rayon de longueur d'onde donnée.

A cet effet, le sulfure de carbone était renfermé dans un tube terminé par des glacés, long de 60 centimètres environ, et renfermé à l'intérieur d'une hélice de 30 centimètres de long (qui appartenait à l'électro-aimant, fig. 191, vol. II, p. 53) et qui contenait 16 kilogrammes de fil de cuivre isolé. Ainsi le tube dépassait l'hélice aux deux bouts. Or, la différence de potentiel magnétique, due à un courant donné, en deux points de l'axe d'une hélice et au delà de ses extrémités, peut se calculer d'après le nombre des tours de cette hélice.

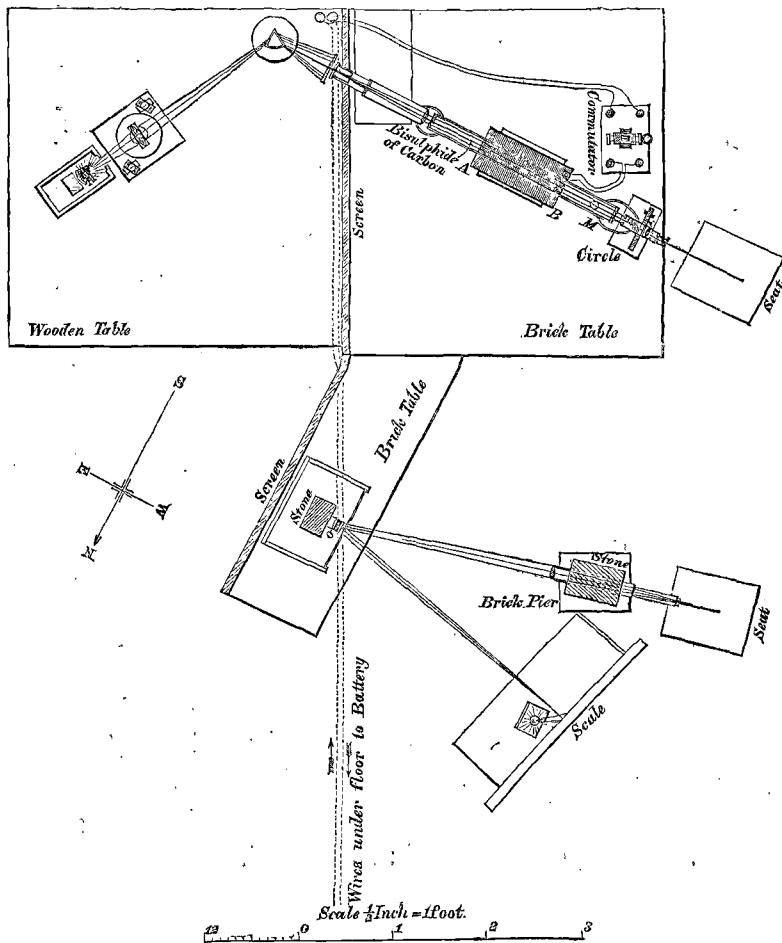
Le nombre de tours n'était pas connu ; on le détermina par le procédé de comparaison indiqué dans l'appendice au chapitre xxx, vol. II, p. 35 ; on trouva : 1028,15.

Pour déterminer l'intensité des courants employés dans les expériences optiques, on suspendait un petit aimant et un miroir en dehors de l'hélice (qui devenait ainsi son propre galvanomètre), et on observait au moyen d'une lunette et d'une échelle.

Pour déterminer l'intensité du courant dans une hélice d'après la déviation d'une aiguille extérieure, il est nécessaire de connaître la somme des aires des tours de l'hélice. On a déterminé cette somme par la méthode indiquée au vol. II, p. 41, et on a trouvé : 77453 centimètres carrés.

LA LUMIÈRE

La lumière était obtenue en projetant sur un écran le spectre donné par une puissante lampe à paraffine et un grand prisme de sulfure de carbone. Une fente dans l'écran laissait passer dans le Nicol telle radiation qu'on voulait. Pour définir la lumière, on enlève la lampe et on la rem-



PL. LV. — Constante de Verdet. (Échel 1/24.)

Wooden table = Table en bois. Brick table = Table en briques. Screen = Écran.
 Bisulphide of carbone = Sulfure de carbone. Commutator = Commutateur. Circle
 = Cercle. Seat = Siège. Stone = Pierre. Brick pier = Pile de briques. Wires
 under floor to Battery = Fils de pile sous le plancher.

placé par une flamme d'alcool colorée par le thallium. Lorsque la ligne verte a été amenée sur la fente, on fixe la lanterne, la lentille et le prisme, on remet la lampe, et la lumière reçue a la même longueur d'onde que la raie du thallium, pour laquelle

$$\lambda = (5,349) 10^{-5} \text{ centimètres (1).}$$

La lumière est polarisée par un prisme de Nicol, rendue parallèle par la lentille d'un collimateur et analysée par un prisme de Jellett mobile dans un cercle divisé.

La planche LV est un plan du laboratoire, montrant la disposition de l'appareil.

Voici la disposition du

PRISMÉ DE JELLETT ET SON CERCLE.

Le prisme de Jellett (2) consiste en un morceau de spath d'Islande, dont les extrémités ont été coupées normalement aux faces latérales (fig. 356). Il est ensuite divisé par un plan faisant un angle d'environ 1 degré avec le plan des deux grandes diagonales. Une des moitiés est retournée, et recollée sur l'autre (fig. 357).

Le prisme est monté dans un tube de laiton, et un diaphragme percé d'un trou de 3 à 4 millimètres de diamètre, pour laisser passer la lumière polarisée, est placé

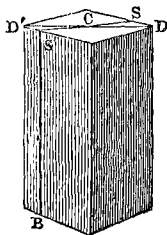


Fig. 356.

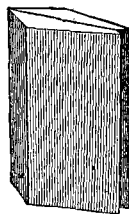


Fig. 357.

(1) Watts, *Index of Spectra*.

(2) Ce prisme est décrit par le Pr. Jellett dans les *Transactions of the Royal Irish Academy*, vol. XXV, 1875, p. 371. Le Pr. Jellett a eu l'obligeance d'indiquer à l'auteur la forme de cet instrument la plus appropriée à ses recherches.

devant un bout du prisme. En regardant par l'autre bout, on voit le trou, par les rayons ordinaires, sous la forme d'un cercle divisé par une ligne droite qui le traverse, la lumière des deux demi-cercles étant polarisée dans des plans qui font l'un avec l'autre un angle de 2 degrés environ. L'image du trou, formée par les rayons extraordinaires, se compose de deux demi-cercles placés l'un à droite, l'autre à gauche du premier cercle (fig. 358).

Un second diaphragme cachait cette dernière image.

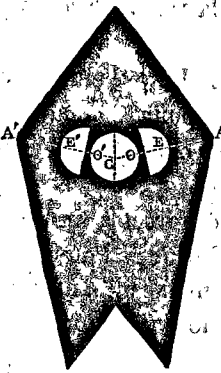


Fig. 358.

Lorsque la lumière qui a traversé un Nicol est examinée avec ce prisme, et que ce dernier est tourné de façon à éteindre la lumière sur une des moitiés du cercle, l'autre moitié est légèrement éclairée. Si maintenant on tourne le Jellet d'un peu moins de 2 degrés, la seconde moitié du cercle devient obscure, et la première est légèrement éclairée.

Il est clair qu'entre ces deux positions, il y en a une pour laquelle

l'éclairement est uniforme sur tout le cercle : cette position peut s'observer avec une grande précision.

Avec les dispositions employées dans cette étude, l'erreur probable est d'environ 1 minute.

Le cercle divisé avait été fait pour ces recherches par M. Browning : il a environ 14 centimètres de diamètre et tourne contre deux verniers fixes ; il est divisé sur cuivre au degré, et les verniers donnent le $\frac{1}{20}$ de degré, soit 3 minutes. Par estime, on pouvait lire la minute avec une parfaite exactitude. On le déplace au moyen d'une vis à long pas en

prise avec un filet taillé sur le pourtour du cercle : on a ainsi des mouvements assez prompts pour que l'on puisse noter les changements d'éclairement d'une partie quelconque du champ, et cependant l'appareil est susceptible d'un réglage très délicat.

FORCE MAGNÉTIQUE HORIZONTALE DE LA TERRE.

Les valeurs du courant déduites des déviations de l'aiguille aimantée ne donnent que le rapport du courant à la force magnétique horizontale H de la terre au temps et au lieu de l'observation. Pour connaître la valeur absolue, il est nécessaire de connaître H .

On conserve à l'Observatoire de Kew l'enregistrement continu des variations de H ; pour connaître H au temps et au lieu des observations optiques, on a tiré des tables de Kew la valeur de la force à Kew, et on a multiplié ce nombre par le rapport des forces à Kew et au laboratoire de l'auteur à Pixholme, Dorking. Pour déterminer ce rapport, on a fait osciller le même aimant à Kew et à Pixholme (1), et après une série de corrections assez laborieuses, on a trouvé que

$$H \text{ à Pixholme} = (0,993366) H \text{ à Kew.}$$

FORMULE

Désignant par la lettre ω la constante de Verdet, on a pour ω la formule suivante :

ω est la rotation du plan de polarisation, exprimée en mesure circulaire, entre deux points, pris sur le rayon lumineux, dont les potentiels magnétiques diffèrent de l'unité : ainsi,

$$\omega = \frac{\theta}{V_{\dots} - V_M}$$

(1) Voy. vol. I, p. 372.

L et M étant les deux bouts du tube, et θ la rotation observée du plan de polarisation, exprimée en mesure circulaire.

RÉSULTAT

Voici le résultat final des expériences :

La moyenne des trois nombres ci-dessous doit être multipliée ensuite par des coefficients dépendant de l'aire, du nombre de tours et de la longueur du tube. Ces nombres sont trois déterminations séparées du rapport de la rotation R du plan de polarisation à la force du courant, laquelle est proportionnelle à H multipliée par la tangente de l'angle de déviation de l'aiguille.

Si les expériences étaient absolument correctes, ces trois nombres seraient identiques ; en fait nous avons :

$$\frac{2R}{H \operatorname{tang} \delta} = \left\{ \begin{array}{l} 1. \dots \dots \dots 50118,4 \\ 2. \dots \dots \dots 49767,0 \\ 3. \dots \dots \dots 49538,7 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{moyenne} \\ 49808,0 \end{array}$$

Ecart extrême : 0,6 pour cent de la moyenne.

Les rotations observées dans les expériences étaient :

Série.	2 R (1).	Éléments de Grovè.
2	11° 58' 30''	5
3	13° 39' 30''	6
1	15° 26' 0''	7

Finalement, si ω est la rotation, dans le sulfure de carbone, de la lumière dont la longueur d'onde est :

$$\lambda = (5,349) 10^{-5},$$

nous avons entre deux points dont les potentiels magnétiques diffèrent de l'unité :

$$\omega = 3,04763 (10^{-5}).$$

(1) 2R est la différence des lectures du cercle quand on renverse le courant : c'est, par suite, le double de la rotation produite.

Les dimensions (1) de la constante sont :

$$[\omega] = [M^{-\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T],$$

car c'est un nombre divisé par une intensité de courant ou par une différence de potentiel magnétique, qui est une quantité de mêmes dimensions que l'intensité de courant.

Telle est, en mesure absolue, la constante de Verdet. Pour une lumière de longueur d'onde donnée et une substance donnée, c'est une quantité physique fixe et définie, ne dépendant que des unités de masse, de longueur et de temps (2).

On définira donc ω la constante de Verdet pour la raie du thallium dans le sulfure de carbone, exprimée en mesure C. G. S.

Je puis ajouter ici le résultat d'un mémoire antérieur que j'ai publié sur le même sujet. C'est la constante pour l'eau distillée et la lumière blanche.

$$\omega = 4,496 (10^{-6}) (3).$$

Mais je n'attache pas grande valeur à ce résultat, les différentes déterminations présentant les rapports de 7,563 7,406 8,295 8,401 6,916 qui montrent des variations de ± 7 pour cent sur la moyenne; l'approximation n'est donc guère que le 1/10 de celle du mémoire actuel. Les méthodes employées pour déterminer les constantes n'étaient pas non plus susceptibles de la même exactitude.

(1) Voy. vol. II, p. 479.

(2) Le pouvoir rotatoire magnétique du sulfure de carbone intervient ici comme la chaleur spécifique de l'eau dans l'équivalent de Joule.

(3) Par une erreur de calcul, on a imprimé 10^{-7} dans l'extrait de ce mémoire publié dans les *Proc. Roy. Soc.*, juin 1875.

EFFET DU MAGNÉTISME TERRESTRE SUR LA LUMIÈRE

M. Henri Becquerel (1) a pu mesurer expérimentalement la rotation magnétique produite dans un tube plein de sulfure de carbone, sous l'influence du magnétisme terrestre ; il a trouvé que la double rotation obtenue en retournant le tube bout pour bout du Nord au Sud magnétique, était environ 6',5 pour 2^m, 50 de sulfure de carbone, avec la lumière jaune D, et a fait remarquer que les résultats obtenus par l'auteur permettent de calculer l'effet observé. On obtient ainsi un nombre très voisin de celui auquel a conduit l'expérience.

Si un canal d'un mille (1609 mètres) de long était creusé près de Kew, du nord au sud, et qu'il fût rempli de sulfure de carbone, un rayon polarisé de la lumière verte, qui a servi dans mes expériences, entrant à un bout, aurait son plan de polarisation dévié de 50 degrés environ à l'autre bout par l'action du magnétisme terrestre.

EXPÉRIENCES DE H. BECQUEREL.

Le 10 juillet 1876, M. Henri Becquerel présenta à l'Académie des sciences de Paris un mémoire intitulé : « Recherches expérimentales sur la polarisation rotatoire magnétique. » (2)

La première partie du mémoire rend compte de la comparaison des pouvoirs rotatoires magnétiques de différentes substances, celui du sulfure de carbone étant pris pour unité.

Les expériences de M. Becquerel étaient faites avec la

(1) *Comptes rendus*, vol. LXXXVI, p. 1077, 1878.

(2) *Ann. de chimie et de phys.*, 1877, 5^e série, vol. XII, p. 5.

lumière jaune ou la lumière rouge, suivant la couleur des substances employées; mais je crois que nous pouvons admettre que le rapport est à peu près la même entre les différentes substances pour toutes les espèces de lumières (1).

Dans cette hypothèse, on peut, au moyen du tableau de M. Becquerel et de ma mesure de la constante de Verdet, calculer ce que serait en mesure circulaire la rotation de chaque substance, pour la lumière verte du thallium, et entre deux points dont les potentiels magnétiques diffèrent de l'unité. Voir la page 555 (2).

RELATION ENTRE L'INDICE DE RÉFRACTION ET LE POUVOIR ROTATOIRE MAGNÉTIQUE.

Dans le même mémoire, M. Becquerel a montré que,

(1) M. Henri Becquerel, qui a bien voulu revoir la partie de la traduction concernant ses recherches, nous communique la note suivante : « Il résulte de la conclusion même, qui est indiquée ci-après, que le rapport des rotations magnétiques de deux substances n'est pas constant quelle que soit la longueur d'onde des rayons lumineux étudiés. Pour passer des résultats obtenus avec la lumière jaune D à ceux que l'on aurait avec des rayons de longueur d'onde λ , il faut multiplier les nombres du tableau qui suit par le

rapport $\frac{\mu_{\lambda}^2 (\mu_{\lambda}^2 - 1)}{\mu_D^2 (\mu_D^2 - 1)} \times \frac{\nu_D^2 (\nu_D^2 - 1)}{\nu_{\lambda}^2 (\nu_{\lambda}^2 - 1)}$, variable avec chaque substance, en désignant par μ_D et μ_{λ} les indices de réfraction de la substance étudiée par les rayons jaunes D et par la lumière de longueur d'onde λ , et par ν_D et ν_{λ} les indices du sulfure de carbone par les mêmes rayons. La correction n'est notable que si les corps ont un pouvoir dispersif assez grand, et c'est le cas du sulfure de carbone. »

J. R.

(2) Il résulte de la note qui précède que les nombres calculés par M. Gordon, et portés dans la dernière colonne du tableau, doivent être corrigés; mais les données manquent pour faire la correction dans tous les cas.

M. Gordon fait remarquer le désaccord qui existe entre le résultat de M. Henri Becquerel, pour l'eau distillée, et celui qu'il a trouvé. Le nombre donné par M. Henri Becquerel est relatif à la lumière jaune et non pas à la lumière rouge, comme l'indique à tort le tableau. Il est identique avec celui qu'ont obtenu divers expérimentateurs, notamment MM. Bertin et de la Rive.

J. R.

pour les mêmes groupes de substances, la relation suivante se vérifie approximativement :

$$\frac{R}{\mu^2 (\mu^2 - 1)} = \text{constante},$$

où R est le pouvoir rotatoire magnétique, et μ l'indice de réfraction.

Mais cette constante a des valeurs différentes pour les différents groupes de substances.

ROTATION DES DIFFÉRENTES RADIATIONS.

M. Becquerel a trouvé que, pour une même substance, la relation entre les rotations magnétiques des différentes radiations peut être représentée assez exactement par la formule :

$$\frac{R\lambda^2}{\mu^2 (\mu^2 - 1)} = \text{constante},$$

où λ et μ sont les longueurs d'onde et les indices de réfraction respectifs des diverses radiations (1).

(1) Parmi les résultats obtenus dans ce travail, un des plus intéressants est relatif aux phénomènes que présentent les rotations INVERSES ou NÉGATIVES des corps magnétiques.

M. Henri Becquerel, en étudiant des dissolutions différemment concentrées, a reconnu que les *pouvoirs rotatoires magnétiques moléculaires négatifs* de certains sels, tels que les chlorures de fer dissous dans l'eau, au lieu d'être constants, comme le sont généralement ceux des substances solubles douées d'un pouvoir rotatoire positif, varient avec la concentration des dissolutions, et croissent proportionnellement au poids de sel dissous. Cette variation du pouvoir rotatoire moléculaire négatif des corps magnétiques avec le rapprochement mutuel des molécules semble de nature à jeter quelque jour sur le rôle que celles-ci jouent dans le phénomène. Les rotations négatives des rayons de diverses longueurs d'onde traversant un corps magnétique présentent aussi une particularité remarquable; les rapports des rotations magnétiques négatives sont sensiblement le carré de ceux qui correspondent aux rotations positives des mêmes rayons. Ces rotations sont très sensiblement proportionnelles à l'expression $\frac{\mu^2 (\mu^2 - 1)}{\lambda^4}$. (Voy. *Ann. de chimie et de physique*, tome XII, et *Comptes rendus*, tome LXXXV, p. 1227.) J. R.

TABLEAU DES POUVOIRS ROTATOIRES MAGNÉTIQUES

Substances.	Densité.	Indice de réfraction.	Rapport de la rotation à celle du sulfure de carbone.	Lumière jaune.		ω = Rotation en mesure circulaire pour la lumière verte du thallium, entre deux points dont les potentiels magnétiques diffèrent de l'unité.
Sulfure de carbone	1,263	1,0249	1,000			3,04763 × 10 ⁻⁵
Acide azotique fumant .....	...	1,4010	0,206			0,6278
— ordinaire .....	...	1,3740	0,291			0,8368
Acide sulfurique monohydraté	1,854	1,4284	0,247			0,7527
— SO ³ + 4H ₂ O .....	...	1,4054	0,286			0,8716
Acide chlorhydrique pur	1,1630	1,4071	0,490			1,4333
Alcool méthylique	0,836	1,3530	0,253			0,7710
— propylique	0,811	1,3836	0,279			0,8502
— butylique	0,807	1,3934	0,294			0,8960
— amylique	0,815	1,4046	0,311			0,9478
Chloroforme .....	...	1,4520	0,380			1,1581
Xylène	0,866	1,4032	0,525			1,6000
Toluène	0,871	1,4028	0,575			1,7354
Benzine	0,883	1,4098	0,636			1,9382
Silvine (KCl cristallisé) .....	...	1,4830	0,672			2,0180
Diamant (cristal octaédrique) .....	...	2,4200	0,301			0,9173
Spath fluor, 1 ^{er} échantillon .....	...	1,4332	0,207			0,6308
— 2 ^e — .....	...	1,4332	0,234			0,7131
Sel gemme	2,260	1,5130	0,843			2,5091
Verre n° 1. Flint lourd	4,380	1,7200	1,360			4,1447
— 2. —	4,860	1,7650	1,533			4,6720
— 6. Flint	3,168	1,5790	0,771			2,3497
— 7. —	3,540	1,6140	0,987			3,0080
— 8. Crown	2,559	1,5260	0,481			1,4659
Borate de plomb fondu n° 1. ....	...	1,7300	1,405			4,2819
— n° 2. — .....	...	1,7300	1,439			4,3855
Silicate de plomb fondu .....	...	1,8200	1,832			5,5832
Solution aqueuse de sous-acétate de plomb .....	...	1,3670	0,375			1,1428
Protochlorure de carbone .....	...	1,4580	0,404			1,2312
Perchlorure de carbone .....	...	1,5620	0,761			2,3192
Borax fondu .....	...	1,5040	0,405			1,2343
Solution concentrée d'azotate d'argent .....	...	1,4580	0,424			1,2922
Chlorure de silicium	1,523	1,4090	0,444			1,3531
Solution concentrée d'azotate de bismuth .....	...	1,4590	0,452			1,3775
Solution concentrée de potasse dans l'eau .....	...	1,4230	0,464			1,4144
Spinelle coloré par le chrome .....	...	1,7150	0,496			1,5116
Solution concentrée de chlorure de magnésium .....	...	1,4300	0,519			1,5817
Protochlorure de phosphore	1,450	1,508	0,651			1,9840
Solution concentrée de protochlorure d'antimoine .....	...	1,4600	0,703			2,2643
Bichlorure de soufre, SCl ₂ .....	...	1,6190	0,932			2,8403
Protochlorure de soufre, S ² Cl	1,687	1,6160	0,984			2,9988
Chlorure d'arsenic	2,172	1,6066	1,000			3,0476
Bichlorure d'étain	2,200	1,5060	1,035			3,1542
Perchlorure d'antimoine	2,280	1,5910	1,656			5,0468
Bisulfure d'hydrogène (impur) .....	...	1,8850	1,743			5,3120
Soufre fondu à 114°	1,96	1,9290	1,904			5,8026
Sous-sulfure de phosphore Ph ² S	1,8007	2,0664	2,592			7,8994
Phosphore fondu à 33°	1,77	2,0740	3,120			9,5086
Blende	4,095	2,3690	5,295			16,1372
Bichlorure de titane .....	...	1,6043	-0,358			-1,0910
				Lumière rouge du Lithium.		
Bromure de soufre	2,696	1,7630	1,942			5,9184
Brome	2,970	1,616	1,960			5,9735
Chlorure de sélénium	2,589	1,8076	2,408			7,3587
Sélénium	4,300	2,655 B	10,960			33,4020
Oxydure de cuivre	5,992	2,849	14,060			42,8496
Acide chlorochromique .....	...	...	-0,089			-0,2438
Eau distillée (H. Bequerel) .....	...	1,3340	0,308			0,9386 × 10 ⁻⁵
Eau distillée (observation directe, Gordon) .....	...	...	...			0,4406 × 10 ⁻⁵

Or, pour le sulfure de carbone, nous avons :

Raie.	Longueur d'onde (1).	Indice de réfraction.
D.....	5,892	1,6333 (2)
E.....	5,269	1,6465 (2)
Verte du Thallium...	5,349	1,6448 (3)

D'où nous déduisons que la rotation, pour une radiation quelconque, dans le sulfure de carbone, et entre deux points dont la différence des potentiels magnétiques est égale à l'unité, est, en mesure circulaire :

$$\omega = \frac{(1,6448)^2 \{ (1,6448)^2 - 1 \} (3,04763 \times 10^{-5})}{(5,349 \times 10^{-5})^2} \cdot \frac{\lambda^2}{\mu^2 (\mu^2 - 1)}$$

$$= 5,9966 \times 10^{-4} \cdot \frac{\lambda^2}{\mu^2 (\mu^2 - 1)}$$

ROTATION DANS LA VAPEUR

Dans le *Philosophical magazine* de mars 1879, les professeurs A. Kündt et W. C. Röntgen ont publié le compte rendu de quelques expériences dans lesquelles ils ont réussi à obtenir une rotation magnétique du plan de polarisation de la lumière dans la vapeur saturée de sulfure de carbone, à la température de 100 degrés centigrades. Ils opérèrent d'abord sur une colonne d'environ un mètre de long, puis sur une autre de 2^m, 40. Ils employaient une série d'hélices comprenant 2400 tours de fil et une pile de 65 éléments Bunsen. Ils obtinrent une rotation distincte qu'ils estiment à un demi-degré environ. Au moment de la publication de leur mémoire, ils n'avaient pas encore réussi à obtenir d'effet avec l'air, mais ils avaient constaté

1) Watts, *Index of Spectra*.

(2) Everett, *Units and Physical Constants*, p. 72.

(3) Par interpolation.

une rotation dans l'acide sulfureux gazeux, à 100 degrés centigrades et sous vingt atmosphères de pression, et dans le gaz hydrogène sulfuré à la pression de vingt atmosphères et à la température ordinaire (1).

ROTATION DANS LES GAZ. — EXPÉRIENCES DE

M. HENRI BECQUEREL (2)

Le 31 mars 1879 (*Comptes rendus*, t. LXXXVII, p. 709), M. Henri Becquerel annonça qu'il était parvenu à manifester et à mesurer la rotation magnétique du plan de polarisation de la lumière avec divers gaz à la température et à la pression ordinaires. L'appareil consistait en un gros tube de cuivre de 3^m,27 de long, et de 0^m,12 de diamètre, fermé par des glaces parallèles travaillées avec le plus grand soin. Ce tube contenait les gaz à étudier; il était soumis à l'influence électro-magnétique de six grosses bobines entourant le tube, et dans lesquelles passait le courant électrique fourni par 80 éléments à acide azotique de grandes dimensions. Chacune des bobines contenait 15 kilogrammes de fil de cuivre isolé, de 3^{mm} de diamètre. La source de lumière était la chaux incandescente d'un chalumeau à gaz oxyhydrique. Les rayons lumineux, après avoir traversé divers écrans colorés convenablement choisis, étaient rendus parallèles par un collimateur, traversaient un très gros polariseur à pénombres, puis passaient au travers du tube. Deux miroirs argentés, placés aux extrémités de celui-ci, permettaient de faire réfléchir plusieurs fois au travers du tube les rayons lumineux qui étaient reçus ensuite sur un analyseur monté sur un cercle divisé

(1) Le phénomène avait été observé quelques mois auparavant pour la vapeur de sulfure de carbone par M. Bichat. (*Comptes rendus*, vol. LXXXVIII, p. 712.) J. R.

(2) Le texte a été modifié d'après les mémoires de M. Becquerel. J. R.

et muni d'une forte lunette. La perfection du réglage était telle, que l'on pouvait obtenir 9 passages au travers du tube sans aucune déformation ni dépolarisation des images, bien que la lumière eût traversé 40 surfaces de verre. On pouvait du reste étudier les rayons lumineux, après une, deux, trois ou quatre réflexions. La concordance entre les divers résultats ainsi obtenus a été complète. On a déterminé avec le plus grand soin la valeur de toutes les petites corrections qui peuvent affecter les mesures directes. Les nombres donnés plus loin sont obtenus avec une précision qui, suivant la grandeur des rotations observées, varie entre 0,015 et 0,003 de leur valeur.

RÉSULTATS

Les derniers résultats de ces expériences ont été publiés le 14 juin 1880 (voir *Comptes rendus*, t. XC, p. 1407, et *Annales de chimie et de physique*, t. XXI, 5^e série.) Ils sont relatifs à six gaz, *Oxygène, Azote, Acide carbonique, Protoxyde d'azote, Acide sulfureux et Gaz oléfiant*: Les mesures ont été rapportées à la température de 0° C. et à la pression de 760 millimètres de mercure. M. Henri Becquerel a ainsi obtenu les résultats suivants :

1° Pour les gaz que nous venons de citer, *à l'exception de l'oxygène, les rotations magnétiques des plans de polarisation des rayons de diverses longueurs d'ordre sont positives, et à très peu près en raison inverse du carré des longueurs d'onde.*

2° Dans les conditions de l'expérience, la rotation magnétique obtenue avec la lumière jaune D, traversant une fois l'appareil plein de sulfure de carbone liquide à la température de 0°, était de 75°,20', soit 4520'. On a pu ainsi rapporter les rotations magnétiques des gaz, pour la lumière

jaune D, à la rotation magnétique du sulfure de carbone liquide à 0°, pour les mêmes rayons lumineux, et l'on a obtenu les nombres suivants :

POUVOIRS ROTATOIRES MAGNÉTIQUES DES GAZ RAPPORTÉS AU SULFURE DE CARBONE LIQUIDE — LUMIÈRE JAUNE D.			
Gaz.	Rotations magnétiques		Indices de réfraction (raie D).
	observées (9 passages au travers de l'appareil)	rapportées au sulfure de carbone.	
		(R)	(μ)
Oxygène.....	5',96	0,000146	1,0002706
Air atmosphérique..	6',48	0,000159	1,0002936
Azote.....	6',56	0,000161	1,0002977
Acide carbonique...	12',28	0,000302	1,0004544
Protoxyde d'azote...	16',02	0,000393	1,0005159
Acide sulfureux....	29',70	0,000730	1,0006650
Gaz oléfiant.....	32',62	0,000802	1,0006780

Ces nombres montrent que les rotations magnétiques des gaz croissent très régulièrement avec les indices de réfraction, et si l'on cherche graphiquement une relation entre ces deux quantités, on trouve une courbe très régulière. Dans le mémoire cité plus haut, (*Annales de chim. et de phys.*, t. XXI, 5^e série), M. Henri Becquerel discute ce résultat et montre que le quotient de la rotation R, obtenue pour chaque gaz, par la fonction $\mu^2(\mu^2 - 1)$, est un nombre du même ordre de grandeur que ceux qui correspondent aux divers corps liquides et solides.

L'oxygène a donné des résultats particulièrement intéressants. Ce gaz a manifesté pour les rayons rouges une rotation magnétique positive très peu supérieure à celle des rayons verts. Les différences entre les deux rotations sont trop faibles pour que l'on puisse affirmer que ce corps disperse les plans de polarisation de la lumière à l'inverse

des autres substances, comme cela semble résulter des expériences de M. H. Becquerel : il y a toutefois une anomalie bien nette ; car, pour les mêmes rayons lumineux, les autres gaz donnent des rotations magnétiques dont le rapport est environ 1,50, le plan de polarisation des rayons verts étant plus dévié que celui des rayons rouges. Cette anomalie paraît liée aux propriétés magnétiques exceptionnelles que présente l'oxygène.

ROTATION DANS LES GAZ. — EXPÉRIENCES DE KÜNDT
ET RÖNTGEN

Le 13 mai 1879, MM. Kündt et Röntgen lurent devant l'Académie de Munich un mémoire où ils annonçaient qu'ils avaient réussi à mesurer les pouvoirs rotatoires magnétiques de différents gaz (1).

Les gaz étaient examinés à la pression de 250 atmosphères.

Ils étaient contenus dans un tube de 1^m,50 de long, de 3 millim. de diamètre intérieur, de 10 millim. de diamètre extérieur. Les glaces qui ferment les bouts du tube étaient maintenues en place par une monture à vis en acier, disposition si heureuse que, le tube étant rempli de gaz à 250 atmosphères de pression, il n'y avait pas de perte appréciable même en douze heures.

On reconnut que cette pression déformait tellement les glaces qu'elles en devenaient doublement réfringentes : pour cette raison on employa, comme polariseur et analyseur, des lames de tourmaline placées à l'intérieur du tube, aux extrémités.

(1) *Ueber die electro-magnetische Drehung der Polarisationsebene des Lichtes in den Gasen*, par A. Kündt et W. C. Röntgen. *Sitzungsber. zu München*, 1879, ii. — *Math. Phys.*, p. 148.

L'une était montée sur l'extrémité fixe; on faisait tourner l'autre en tournant l'ensemble du tube, à l'exception de l'autre bout auquel était fixée la tourmaline analyseur.

Six grandes hélices, reliées à la pile, étaient placées en dehors du tube.

On mesurait le courant en le faisant passer dans une petite hélice, entourant un tube court, plein de sulfure de carbone, et observant la rotation.

On comparait les actions des deux hélices en enlevant le tube à gaz et le remplaçant dans la grande hélice par un long tube contenant du sulfure de carbone.

On mesurait la grandeur de la rotation au moyen d'un miroir et d'une lunette.

On commençait la compression avec la pompe ordinaire et on la terminait en forçant, à la presse hydraulique, de la glycérine dans un grand réservoir de fer relié au tube à gaz.

Comme aucun manomètre ne donnerait de mesures précises à ces hautes pressions, on les évaluait en comparant le volume du tube au volume occupé par une fraction connue du gaz comprimé après son expansion.

On a trouvé que le gaz restait opaque pendant plusieurs heures après sa compression. Ce phénomène est dû à ce que le gaz, échauffé par la compression, chauffe les parois du tube, ce qui cause des réfractions inégales. Pour hâter le refroidissement, on entourait le tube d'une enveloppe traversée par un courant d'eau froide.

RÉSULTATS

On a trouvé que :

1° L'air atmosphérique, l'oxygène, l'azote, l'acide carbonique, l'oxyde de carbone, le gaz d'éclairage, l'éthylène et le gaz des marais devient tous le plan de polarisation dans

GORDON. Électricité.

II. — 36

le sens du courant magnétisant, c'est-à-dire que leur rotation se fait dans le même sens que celle du sulfure de carbone et de l'eau.

2° Que, dans les mêmes conditions, la grandeur de la rotation varie beaucoup avec les différents gaz.

3° Que, pour un gaz quelconque, et dans les mêmes circonstances, la rotation est proportionnelle à la densité.

Voici un tableau général des résultats.

Gaz.	Pression employée	Rotation mesurée	d = nombre d'atmosphères auquel il faudrait comprimer le gaz pour le faire agir aussi énergiquement que le sulfure de carbone liquide.	$S = \frac{1}{d}$ = rapport de la rotation dans le gaz à 760 ^{mm} et à 0° C., à celle dans le sulfure de carbone liquide.	ω = rotation dans les gaz, en mesure circulaire, pour la raie verte du thallium, entre deux points dont les potentiels magnétiques diffèrent de l'unité, à 0° C. et 760 ^{mm} .
	dans des expériences différentes, avec différentes intensités de courant.				
	atmosphères.				
Hydrogène.....	121 à 210	51' à 1° 41'	7253	0,0001379	$4,20268 \times 10^{-9}$
Oxygène.....	70 à 237	38' à 2° 5'	6782	0,0001474	$4,49220 \times 10^{-9}$
Air.....	144 à 227	55' à 1° 53'	5495	0,0001819	$5,54364 \times 10^{-9}$
Oxyde de carbone...	172 à 222	1° 54' à 3° 3'	3862	0,0002589	$7,89031 \times 10^{-9}$
Gaz des marais.....	113 à 190	2° 32' à 5° 15'	2481	0,0004031	$12,28499 \times 10^{-9}$

Le professeur Röntgen m'a envoyé, dans une lettre datée du 28 avril 1880, les résultats encore inédits des recherches qu'il a continuées avec le professeur Kündt.

Ils ont comparé les actions des gaz à celle d'un tube plein d'eau de même longueur; le tube d'eau était comparé au sulfure de carbone. Ils ont trouvé les nombres suivants. S et ω ont la même signification que dans le tableau précédent :

	Oxygène.	Azote.	Air.	Hydrogène.	Oxyde de carbone.
S	0,000109	0,000127	0,000127	0,000132	0,000232
ω	$3,322 \times 10^{-9}$	$3,870 \times 10^{-9}$	$3,870 \times 10^{-9}$	$4,023 \times 10^{-9}$	$7,060 \times 10^{-9}$

EFFET DU MAGNÉTISME TERRESTRE

En comparant leurs résultats à ceux de M. H. Becquerel et aux miens, MM. Kündt et Röntgen ont calculé quelle serait la rotation produite dans l'air atmosphérique par l'action du magnétisme terrestre.

Ils ont trouvé que la lumière, allant du nord au sud, devrait traverser 253 kilomètres, ou 158 miles, pour tourner de un degré. D'après les expériences de M. H. Becquerel, on trouverait 300 kilomètres.

ROTATION DANS L'AIR PRODUITE PAR LE MAGNÉTISME
TERRESTRE. — H. BECQUEREL

Le 17 novembre 1879, M. Henri Becquerel annonça à l'Académie des sciences de Paris (1) qu'il avait réussi à observer une rotation causée par l'action du magnétisme terrestre sur l'atmosphère.

On sait que la lumière du ciel est polarisée dans un plan qui coïncide à peu près avec celui qui est déterminé par le soleil, l'observateur et le point du ciel que l'on vise ; nous appellerons ce plan « plan du soleil ».

M. Becquerel discute d'abord le fait, découvert par lui, que cette coïncidence n'est pas exacte, et montre que l'angle des deux plans est variable aux diverses heures de la journée. Il établit ensuite que, s'il n'intervenait pas de cause perturbatrice, le plan de polarisation devrait coïncider avec le plan du soleil, lorsque celui-ci est vertical.

Or, on trouve qu'il y a un petit angle entre ces plans, lequel est dû à l'action du magnétisme terrestre sur l'air.

(1) *Comptes rendus*, t. LXXXIX, p. 838.

On a fait les déterminations suivantes :

Points visés.	Distance zénithale apparente.	Rotation observée.	Erreur maximum.
Horizon sud.....	85° 0'	0° 22'	± 5'
Horizon nord.....	86° 27'	0° 24'	± 5'
Méridien magnétique sud. }	85° 20'	0° 42'	± 12'
	87° 27'	0° 59'	± 15'

Cette rotation, que l'on suppose due à une influence magnétique, ne doit pas exister pour une direction perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison. Les observations faites dans une région perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison ont montré en effet que la rotation était sensiblement nulle (1).

(1) DOUBLE RÉFRACTION CIRCULAIRE DES CORPS SOUMIS A L'ACTION DU MAGNÉTISME. — Fresnel a montré qu'un rayon lumineux polarisé rectilignement, traversant une lame de quartz perpendiculaire à l'axe, peut se décomposer en deux rayons polarisés circulairement en sens inverse, et qui se propagent dans le cristal avec des vitesses inégales; ce phénomène correspond à une rotation du plan de polarisation du rayon lumineux incident. M. Henri Becquerel (*Comptes rendus*, t. LXXXVIII, p. 334, février 1879) s'est proposé de rechercher si les mêmes considérations sont applicables au phénomène de la polarisation rotatoire magnétique. Il faisait interférer, de manière à produire les franges d'Young, deux rayons polarisés circulairement et traversant chacun un parallépipède de flint lourd. Les deux parallépipèdes étaient identiques et pouvaient être soumis à des actions magnétiques puissantes, inverses pour chacun d'eux. Suivant le sens de l'aimantation, ou suivant le sens des vibrations circulaires, on voyait les franges se déplacer dans un sens ou dans l'autre. Cette expérience montre que l'influence magnétique a pour effet d'avancer ou de retarder la marche d'un rayon circulaire au travers des parallépipèdes de flint.

D'après Fresnel, si la rotation du plan de polarisation est R , la variation de phase due au retard subi par un seul des deux rayons circulaires serait $\frac{R}{2\pi}$; dans l'expérience citée ici, on avait $R = 24^{\circ}26'$, d'où $\frac{R}{2\pi} = 0,068$. Le déplacement observé pour les franges a été environ 0 frange, 07. Il y a donc accord complet entre l'expérience et le calcul auquel conduit le phénomène de la double réfraction circulaire.

Quelques mois auparavant, M. Righi (*Il Nuovo Cimento*, t. IV, 1878), avait

THÉORIE

L'explication des phénomènes de rotation magnétique de la lumière polarisée est encore extrêmement obscure; et il n'est pas probable qu'on puisse avoir une explication complète tant qu'on ne sera pas beaucoup plus avancé sur la nature de la lumière et de l'électricité que nous ne le sommes maintenant. Le professeur Maxwell a donné une explication provisoire fondée sur le raisonnement suivant (1) :

On sait que deux vibrations circulaires uniformes, de même amplitude, de même période et dans le même plan, mais de sens contraires, équivalent à une vibration rectiligne passant par les points où se croiseraient deux molécules décrivant dans les conditions indiquées les trajectoires données.

On sait aussi que si l'on accélère l'une des vibrations, on fait tourner la direction de la vibration rectiligne équivalente dans le sens du mouvement ajouté (2). Cette accélération peut être produite par un mouvement du milieu dans lequel s'exécutent les vibrations.

Ce mouvement, qui doit être rotatoire, peut être ou bien un mouvement d'ensemble du milieu ou de parties perceptibles du milieu, ou bien un mouvement des molécules du milieu.

également conclu de ses expériences que, dans les liquides, la rotation magnétique du plan de polarisation de la lumière se fait par suite de la double réfraction de deux rayons polarisés circulairement en sens inverse. J. R.

(1) *Electricity*, 811, vol. II, p. 407.

(2) Je n'ai pas donné d'explication de la théorie de la composition des vibrations : c'eût été déplacé dans un ouvrage sur l'électricité. On en trouvera une explication très claire dans le livre déjà cité de M. Spottiswoode sur la polarisation de la lumière. J'y renvoie le lecteur, car il est impossible de comprendre les relations entre l'électricité et la lumière sans connaître au préalable les phénomènes élémentaires de la polarisation.

L'expérience journalière nous montre qu'il n'y a pas de mouvement de parties perceptibles du milieu ; par suite tout mouvement rotatoire existant ne peut être qu'une rotation des molécules autour de leurs propres axes. De tels mouvements, bien qu'incapables de produire sur une substance un effet appréciable par les méthodes ordinaires, pourront peut-être devenir perceptibles par la méthode d'investigation si délicate que nous donne l'emploi de la lumière polarisée.

La théorie qui attribue au mouvement rotatoire des molécules les phénomènes magnétiques et autres, est appelée « théorie des tourbillons moléculaires ». Le lecteur la trouvera exposée dans l'*Electricity* de Maxwell, (vol. II, art. 822-831, p. 408-417), la théorie étant trop complexe et trop purement mathématique pour être discutée dans cet ouvrage. Voici cependant deux citations de Maxwell, que je puis me permettre d'introduire :

« Jusqu'ici, nous avons été obligé d'employer un langage qui rappelle peut-être trop les hypothèses sur le mouvement dans la théorie ondulatoire. Mais il est aisé d'énoncer notre résultat sous une forme indépendante de cette hypothèse.

» Quelle que soit la nature de la lumière, il y a en chaque point de l'espace quelque chose qui se produit, déplacement, rotation, ou autre chose non encore imaginée, mais qui est certainement de la nature d'un « vecteur » ou d'une quantité qui a une direction, et cette direction est normale à celle du rayon. Cela est complètement prouvé par le phénomène des interférences.

» Dans la lumière polarisée circulairement, la grandeur de ce vecteur reste toujours la même, mais sa direction tourne autour de la direction du rayon, de façon à exécuter

une révolution complète pendant la durée de période de l'onde.

» L'incertitude qui existe sur la question de savoir si ce vecteur est dans le plan de polarisation ou perpendiculaire à ce plan, ne s'étend pas à la question du sens de sa rotation dans la lumière polarisée circulairement à droite ou à gauche. La direction et la vitesse angulaire de ce vecteur sont parfaitement connues, quoique l'on soit incertain de sa nature physique et de sa direction absolue à un instant donné.

» Quand un rayon de lumière polarisée circulairement tombe sur un milieu soumis à l'action de la force magnétique, sa propagation dans le milieu dépend de la relation entre le sens de la rotation de la lumière et la direction de la force magnétique. De là, nous concluons par le raisonnement de l'article 820, que dans le milieu soumis à l'action de la force magnétique, il se produit un mouvement rotatoire, dont l'axe de rotation est dans la direction des forces magnétiques; et que la vitesse de propagation de la lumière polarisée circulairement, quand le sens de la rotation vibratoire et celui de la rotation magnétique sont les mêmes, diffère de la vitesse de propagation quand ces directions sont contraires.

» La seule analogie que l'on puisse établir entre un milieu où se propage de la lumière polarisée circulairement et un milieu traversé par des lignes de force magnétique, est que, dans les deux cas, il y a un mouvement de rotation autour d'un axe. Mais là s'arrête la ressemblance, car dans le phénomène optique, la rotation est celle du vecteur qui représente la perturbation.

» Ce vecteur est toujours perpendiculaire à la direction du rayon, et tourne autour de lui un nombre de fois déter-

miné par seconde. Dans le phénomène magnétique, ce qui tourne n'a pas de propriété qui permette d'en distinguer les côtés, en sorte qu'on ne peut déterminer combien de tours il fait par seconde.

» Il n'y a donc rien dans le phénomène magnétique qui corresponde à la longueur d'onde et à la propagation de l'onde dans le phénomène optique. Un milieu soumis à une force magnétique constante n'est pas, par suite de l'existence de cette force, occupé par des ondes se déplaçant dans une direction unique, comme lorsque de la lumière s'y propage. La seule ressemblance entre les phénomènes optique et magnétique est qu'il existe en chaque point du milieu quelque chose de la nature d'une vitesse angulaire autour d'un axe dirigé suivant la force magnétique (1). »

La seconde citation suit une discussion mathématique de la théorie des tourbillons moléculaires :

« Je crois qu'il existe de bonnes raisons en faveur de cette opinion qu'il se produit dans le champ magnétique un phénomène de rotation ; que cette rotation est exécutée par un grand nombre de très petites portions de la matière, tournant chacune autour de leur axe propre, cet axe étant parallèle à la direction de la force magnétique, et que les divers tourbillons sont reliés par une sorte de mécanisme qui met leurs rotations dans une dépendance mutuelle.

» La tentative que j'ai faite en imaginant, et en faisant fonctionner un modèle de ce mécanisme, ne doit pas être prise pour plus qu'elle n'est réellement, c'est-à-dire une démonstration de la possibilité de trouver un mécanisme capable d'établir une liaison mécanique équivalente à la liaison qui existe réellement entre les parties d'un champ

(1) *Electricity*, 821, vol. II, p. 407.

électro-magnétique. Le problème, consistant à déterminer le mécanisme nécessaire pour établir une relation d'espèce donnée entre les mouvements des parties d'un système, admet toujours une infinité de solutions.

» De ces solutions, les unes peuvent être plus simples ou plus complexes que les autres, mais toutes doivent satisfaire aux conditions générales du mécanisme. Toutefois, les résultats suivants de la théorie ont une plus haute importance :

» 1° La force magnétique est l'effet de la force centrifuge des tourbillons moléculaires ;

» 2° L'induction électro-magnétique des courants est l'effet des forces mises en jeu quand la vitesse des tourbillons change ;

» 3° La force électro-motrice provient de l'effort qui s'exerce sur le mécanisme de liaison ;

» 4° Le déplacement électrique provient de la déformation élastique du mécanisme de liaison (1). »

(1) *Electricity*, 831, vol II, p. 416.

CHAPITRE XLVI

DÉCOUVERTES DU D^r KERR

RELATION ENTRE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE ET LA LUMIÈRE POLARISÉE

La découverte très remarquable du D^r Kerr, de Glasgow, a été publiée dans le *Phil. Mag.* de novembre 1875.

Le D^r Kerr a reconnu que lorsque le verre et certains autres diélectriques sont soumis à une déformation électrique intense, ils acquièrent la propriété de biréfringence, et transforment la lumière polarisée rectilignement en lumière polarisée elliptiquement.

Dans ses premières expériences, il avait foré dans une plaque épaisse de verre (fig. 359) deux trous parallèles à ses grandes faces, et arrivant jusqu'à $\frac{1}{8}$ de pouce ($3^{\text{mm}}, 2$)



FIG. 359.

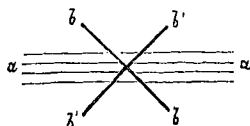


FIG. 360.

l'un de l'autre. Des fils sont introduits dans ces trous et reliés à une bobine d'induction : de la lumière polarisée dans un plan à 45 degrés de la ligne des fils (fig. 360), traverse normalement le verre, et est reçue par un second Nicol placé de façon à produire l'extinction (1).

(1) Dans la figure 360, *aa* est la ligne de déformation électrique; *bb*, *b'b'* la direction des vibrations optiques. Le rayon lumineux est perpendiculaire au lan du papier.

Lorsque l'on fait fonctionner la bobine, les étincelles passent dans l'air entre les électrodes de décharge ordinaires, et le verre est soumis à une tension qui croît à mesure que l'on écarte les électrodes.

Aussitôt que les pointes ont été suffisamment écartées pour que la tension devienne considérable, la lumière reparait et ne peut plus être éteinte en tournant le Nicol.

Si l'angle du plan de polarisation et de la ligne de tension électrique diffère de 45 degrés, l'effet diminue; il devient nul pour un angle de 0 degré ou de 90 degrés.

Dans un second mémoire (1), le D^r Kerr annonce qu'il a réussi à obtenir des effets avec les liquides suivants :

Sulfure de carbone, benzine, huile de paraffine et huiles de kérosène, térébenthine, huile d'olives.

Depuis la première publication de la découverte du D^r Kerr, j'ai réussi, au moyen d'appareils (fig. 361) de plus grandes dimensions que ceux dont disposait le D^r Kerr, à

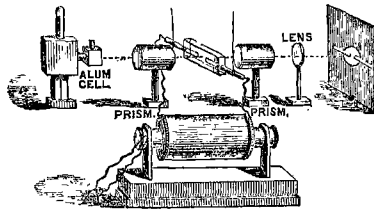


FIG. 361. (Alum Cell = cellule d'alun. Prism = prisme. Lens = lentille.

augmenter suffisamment les effets pour pouvoir les projeter sur un écran, à la lumière électrique, et les montrer à un nombreux auditoire, à l'Institution Royale, le 6 février 1879.

Les images des pointes étaient écartées d'environ 1 pouce et 1/2 (3^{cm},8), et quand la bobine fonctionnait, on voyait

(1) *Phil. Mag.*, déc. 1875, p. 446.

sur l'écran une tache de lumière blanche de 3 pouces (7^{cm},6) de diamètre environ (1).

Dans le *Phil. Mag.*, août et septembre 1879, le docteur Kerr décrit une nouvelle série d'expériences plus étendues sur le même sujet. Tous les diélectriques étaient liquides et contenus dans une cellule construite spécialement dans ce but; l'électricité était produite par une machine ordinaire à plateau. Le docteur Kerr termine son mémoire par le résumé suivant de ses résultats :

1° Quand un liquide isolant est traversé par une force électrostatique, il exerce une action biréfringente sur la lumière transmise. Eu égard à cette action, les liquides peuvent être divisés en deux classes : positifs et négatifs.

2° Les liquides positifs agissent comme du verre soumis à une

(1) En répétant l'expérience, la veille de la conférence, on laissa par accident la tension électrostatique devenir assez forte pour percer le verre. Immédiatement avant qu'il ne fût percé, il se produisit quelques effets très remarquables.

D'abord, on vit une tache de lumière brun-orange, de 6 à 7 pouces (0^m,45 à 0^m,18) de diamètre, qui se divisa aussitôt en quatre ou cinq anneaux concentriques irréguliers, foncés et brun-orange; l'anneau extérieur pouvait avoir 14 pouces (0^m,36) de diamètre. Deux secondes après, ils disparurent et furent remplacés par une grande croix noire, pouvant avoir 3 pieds (0^m,90), se détachant sur un fond de lumière faible. Les bras de la croix étaient dirigés suivant les plans de polarisation, et par suite (l'expérience étant disposée d'après les indications du D^r Kerr), à 45 degrés sur la ligne de tension.

A ce moment, le verre céda et tous les phénomènes disparurent, excepté les bouts extrêmes de la croix, et on ne vit plus que la décharge à travers le trou percé dans le verre.

Ces phénomènes ont été vus par MM. Cottrell, Valter (le second préparateur) et par moi-même. On fora aussitôt une nouvelle plaque de verre dans l'espoir de répéter l'expérience à la conférence du lendemain; mais, les étincelles jaillissant tout autour de la plaque, nous ne pûmes réussir à percer le verre, et on ne vit que la réapparition légère de la lumière décrite par le D^r Kerr.

Depuis, j'ai fait de nombreux essais, et j'ai détruit pas mal de plaques de verre coûteuses; mais toujours la perforation s'est produite brusquement et non graduellement, et je n'ai pu réussir à reproduire les effets. (*Proc. Roy. Soc.*, 13 février 1879). Comparez page 581.

extension suivant une direction parallèle aux lignes de force électrique, ou comme des lames de quartz ou d'un autre cristal positif uniaxe, dont l'axe est parallèle aux lignes de force. Le sulfure de carbone en est le meilleur exemple.

3° Les liquides négatifs agissent comme du verre soumis à la compression suivant une direction parallèle aux lignes de force, ou comme des lames de spath d'Islande ou d'un autre cristal négatif uniaxe, dont l'axe est parallèle aux lignes de force. L'huile de colza en est un des meilleurs exemples.

4° Dans le tableau suivant, les liquides positifs ont été disposés autant que possible dans l'ordre décroissant de leur pouvoir électro-optique, les intervalles les plus grands et les plus tranchés étant marqués par des lignes de séparation. Les liquides négatifs n'ont pas été ainsi disposés; mais les huiles de colza et de veau marin sont certainement les plus actifs, et l'huile de lin est le moins actif de ces liquides.

LIQUIDES POSITIFS

Sulfure de carbone.	Amylène.
Cumol.	Huile de paraffine (densité=0,814).
Huile de paraffine (densité=0,890).	Blanc de baleine.
Bichlorure de carbone.	Térébène.
Xylol.	Brômotoluol.
Toluol.	Acide valérique?
Cymol.	
Benzol.	

LIQUIDES NÉGATIFS

Huiles fixes d'origine végétale.	Huiles fixes d'origine animale.
Huile de colza.	Huile de phoque.
— d'amandes douces.	— de foie de morue.
— d'olives.	— de lard.
— de pavots.	— de pied de bœuf.
— de navette.	
— de noix.	
— de graine de moutarde.	
— de lin.	

L'action biréfringente de ces vingt-six substances a été observée plusieurs fois; elle est parfaitement régulière et parfaitement pure.

Pour l'acide valérique seul, elle est si faible qu'on peut la regarder comme douteuse.

5° Tous les liquides négatifs connus jusqu'à ce jour appartiennent à la classe des huiles fixes. Le blanc de baleine occupe une place à part ; il est nettement positif.

6° L'influence de la densité sur le pouvoir électro-optique est marquée, et, dans le cas de certaines huiles de paraffine, un accroissement de densité était accompagné d'un accroissement de pouvoir électro-optique.

7° Dans le sulfure de carbone et d'autres liquides, les mesures électro-optiques peuvent se faire pour des variations étendus dans l'échelle des effets optiques et électriques.

8° Sous l'influence de la force électro-statique, le chlorure d'étain exerce une action optique très énergique, mais dont le caractère n'est pas très bien défini.

9° Sur plus de quarante liquides examinés jusqu'à présent dans la cellule plate, les seuls qui possèdent un certain pouvoir isolant sont les vingt-sept cités dans les numéros 4 et 8 : ce qui paraît justifier la généralité du principe posé au numéro 1.

10° Quand le nitrobenzol est traversé par un courant électrique intense, il exerce sur la lumière transmise une action biréfringente pure. Son action est semblable à celle d'un cristal positif uniaxe, dont l'axe est parallèle à la ligne de décharge.

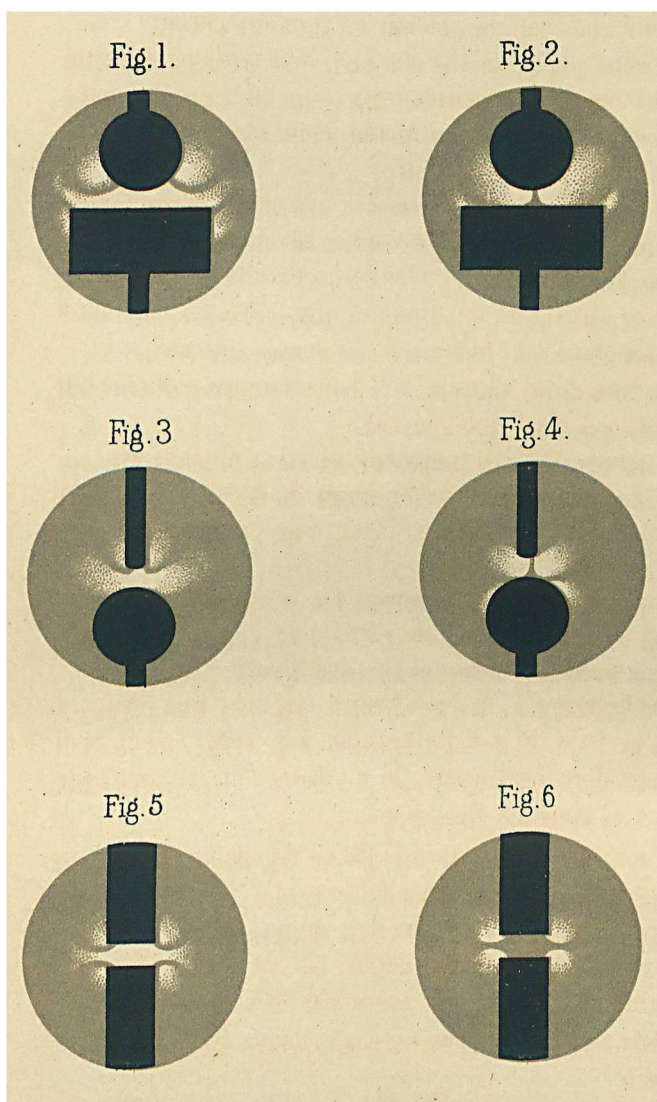
EXPÉRIENCES DU PROFESSEUR RÖNTGEN (pl. LVI)

Le 8 décembre 1879, le professeur W. C. Röntgen, de Geissen, a rendu compte d'expériences où il a répété sur une grande échelle celles du D^r Kerr (1).

Il emploie des Nicols de grandes dimensions, une lumière Drummond puissante, et une cellule de verre haute de 12 centimètres, large de 6 et épaisse de 3, pleine de sulfure de carbone. Les électrodes sont disposées de façon que les lignes de force soient verticales.

Il a observé des effets magnifiques. Quand la machine

(1) *Ueber die von Herrn Kerr gefundene neue Beziehung zwischen Licht und Electricität*, XIX. Ber. der. Oberh. Gesellschaft für Natur. und Heilk., p. 1.



GORDON. Electricité

PL. LVI. — Répétition par M^r Röntgen des expériences électro-optiques de M^r Kerr.

Publié par J.-B. BAILLIÈRE ET FILS, à Paris

Imp. FRAILLERY

électrique fonctionnait, la lumière reparaisait avec tant d'intensité que l'œil ne pouvait en soutenir l'éclat.

Ces beaux effets étaient obtenus, non seulement quand les plans des Nicols croisés étaient inclinés de 45 degrés sur la verticale, mais aussi quand ils lui étaient l'un parallèle et l'autre perpendiculaire.

Ce résultat semble au premier abord en contradiction avec celui constaté par le D^r Kerr, à savoir, que la lumière ne reparait pas quand les plans sont parallèles ou perpendiculaires aux lignes de force, et que l'effet est maximum quand les plans sont inclinés de 45 degrés sur ces lignes.

L'examen de la planche LVI nous montre toutefois que ce désaccord n'est qu'apparent.

Les figures 1, 3, 5, montrent les effets obtenus avec diverses électrodes, lorsque les plans de Nicols croisés sont à 45 degrés de la verticale : c'est ce qu'on appelle la « position I » des Nicols.

Les figures 2, 4, 6 montrent les effets correspondants lorsque les plans sont l'un vertical et l'autre horizontal, ce qu'on appelle « position II » des Nicols.

Dans la figure 1, les électrodes étaient : une plaque de laiton, au fond de la cellule, reliée à la terre; et une boule de laiton d'un centimètre de diamètre, placée au-dessus, reliée à la machine électrique.

On voit que la plus grande partie du champ est éclairée, et la partie la plus brillante est le centre. On aperçoit deux houppes obscures, en forme de « queues » (*schwänze*), qui se recourbent vers le bas depuis les côtés de la boule. La direction de ces houppes passe par le centre de la boule, et quitte sa surface sous un angle de ± 45 degrés avec la verticale.

Quand le liquide de la cellule n'est pas tout à fait lim-

pide, les grains de poussière se rangent suivant les lignes de force et permettent de voir leur direction. Les lignes de force sont verticales au centre du champ; mais comme elles partent de chaque point de la boule normalement à sa surface (1), et qu'elles se recourbent vers la plaque, il doit y en avoir dans toutes les directions aux différents points près des bords du champ.

Les houppes obscures sont le « lieu » des points où la tangente à la ligne de force est parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation.

La figure 2 est complémentaire de la figure 1. Les lignes de force et le plan de polarisation sont parallèles ou perpendiculaires l'un à l'autre au centre du champ, et par suite il y a là une bande verticale obscure; sur les côtés, leur angle est de 45 degrés, et par suite ces parties sont brillamment éclairées.

Dans ses expériences, le D^r Kerr ne faisait usage que d'un champ de petites dimensions; par suite, quand les plans de ses Nicols étaient l'un vertical et l'autre horizontal, il ne voyait pas de lumière parce qu'il regardait la région occupée par la bande verticale obscure de la figure 2.

Ainsi les expériences du professeur Röntgen confirment entièrement la découverte du D^r Kerr : l'électricité exerce sur la lumière son maximum d'effet quand la ligne de force et le plan de polarisation font un angle de 45 degrés; et il n'y a pas du tout d'effet quand la ligne de force coïncide avec le plan de polarisation ou lui est perpendiculaire.

EFFET D'UN COMPENSATEUR EN VERRE DÉFORMÉ

Quand le verre est déformé suffisamment pour le faire

(1) En effet, la surface d'un conducteur est une surface équipotentielle, et les lignes de force lui sont normales.

agir comme un cristal de signe opposé au diélectrique; il produit des effets inverses de ceux du diélectrique; ou, si on l'emploie en même temps que le diélectrique, il compense plus ou moins complètement l'effet électro-optique, suivant la grandeur de la déformation.

Quand on introduit un morceau de verre sur le trajet du faisceau lumineux qui produit la figure 1, et qu'on le comprime dans une direction verticale, les houppes se rapprochent graduellement et finissent par se rejoindre en formant une bande semblable à celle de la figure 2. Si la compression est poussée plus loin encore, la « queue » semble se ramasser sur la boule, et finit par disparaître.

Si le verre est comprimé horizontalement, les apparences inverses se produisent, le centre du champ devient plus brillant, les côtés plus sombres, et les houppes se courbent vers le dehors.

Lorsque les Nicols sont dans la position II, on ne produit aucun effet en comprimant le compensateur suivant l'horizontal ou la verticale. Si on le met à 45 degrés, on rend le champ dissymétrique.

Dans les figures 3 et 4, l'électrode inférieure est formée d'une boule de 1 centimètre de diamètre; l'électrode supérieure, d'un fort fil de laiton.

Les figures 3 et 4 représentent les effets obtenus en plaçant les Nicols dans les positions I et II.

Les houppes ou « queues » obscures sont, dans les deux cas, le « lieu » des points où les lignes de force sont parallèles ou perpendiculaires aux plans de polarisations.

Les figures 5 et 6 représentent les deux apparences correspondantes que l'on observe en employant des électrodes faites de fortes tiges rectangulaires en laiton. Les houppes sombres constituent toujours le même « lieu ».

On a essayé diverses autres formes d'électrodes avec des résultats analogues.

AUTRES DIÉLECTRIQUES

On a obtenu aussi cet effet avec de l'huile de foie de morue. Elle agissait plus faiblement que le sulfure de carbone et en sens inverse. Le sulfure de carbone agissait comme du verre soumis à une *extension* le long des lignes de force; l'huile de foie de morue, comme du verre soumis à une *compression* suivant la même direction.

Ainsi se trouve complètement établie la classification des liquides en liquides positifs et négatifs, analogues aux cristaux positifs et négatifs. La térébenthine agit comme l'huile de foie de morue.

LIQUIDES PARTIELLEMENT CONDUCTEURS

Les effets ont été obtenus avec le nitrobenzol, l'éther sulfurique, la glycérine et l'eau distillée, mais seulement quand une étincelle éclatant dans l'air était interposée dans l'un des fils, et que la machine était reliée à une bouteille de Leyde.

On voyait alors dans le champ un éclat de lumière correspondant à chaque étincelle. Ce résultat est particulièrement intéressant, puisqu'il nous montre qu'il y a dans les conducteurs un état momentané de déformation précédant la détente qui s'opère quand la matière cède.

TUBE A VIDE

Le professeur Röntgen a essayé de faire traverser par la lumière un tube où l'on avait fait un vide si parfait que la décharge ne pouvait plus passer. On n'a observé aucun effet, même en maintenant une forte différence de potentiel entre les électrodes.

LIQUIDES EN MOUVEMENT

Le professeur Röntgen a reconnu que l'on peut imiter en partie les effets de déformation électrique, en faisant passer le liquide sous forme d'un courant rapide à travers la cellule.

DIÉLECTRIQUES DIVERS

En comparant différents liquides, le professeur Röntgen, a trouvé, conformément aux résultats plus complets du D^r Kerr, que les diélectriques soumis à l'influence de la déformation électrique agissent sur la lumière comme des cristaux uniaxes, ayant pour axe la ligne de déformation électrique, et que, comme les cristaux, leur action est variable, faible ou énergique, positive ou négative (1). Le sulfure de carbone agit comme un cristal positif.

LOI ÉLECTRO-OPTIQUE DU D^r KERR

En mars 1880 (2), le D^r Kerr a publié les résultats d'une série de mesures quantitatives de l'effet électro-optique. Toutes ses expériences ont été faites sur le sulfure de carbone, mais il ne paraît pas douteux que la loi établie par ces expériences ne soit d'une application générale et universelle.

Il a trouvé que la loi suivante se vérifie avec une rigueur absolue :

L'intensité de l'action électro-optique d'un diélectrique

(1) Tous les cristaux uniaxes partagent les rayons lumineux en deux : le rayon *ordinaire* et l'*extraordinaire*. Celui des deux rayons qui marche le plus lentement est le plus réfracté. Les cristaux où le rayon ordinaire marche le plus vite sont appelés positifs; ceux où le rayon extraordinaire marche le plus vite sont appelés négatifs. Voir Spottiswoode, *Polarization of Light*, p. 92.

(2) *Phil. mag.*, 1880, p. 157.

donné, c'est-à-dire la quantité d'effet optique, ou la différence de marche du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire, par unité d'épaisseur du diélectrique, varie en raison directe du carré de la force électrique résultante.

INSTRUMENTS. — LA CELLULE

La cellule (fig. 362) consistait en un bloc de verre plat, de 10 pouces ($0^m,254$) sur 6 ($0^m,152$), formé de trois lames placées verticalement, et ayant une épaisseur totale de 3 pouces $15/16$ ($0^m,10$) exactement.

La figure 362 montre la vue en bout de ce bloc. Le rec-

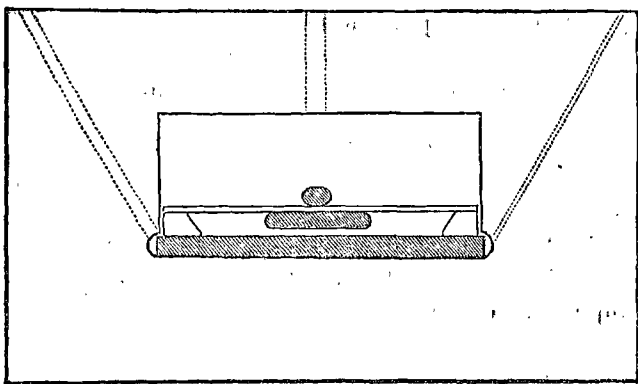


FIG. 362.

tangle intérieur représente un canal qui le traverse en ligne droite. Les bouts de ce canal sont fermés par des lames de verre mince et bien clair. Ces lames sont recouvertes extérieurement d'un tissu épais de caoutchouc, sur lequel sont appliqués de forts bordages d'acajou, plus longs que les bouts de la cellule et reliés ensemble à chaque extrémité par de forts boulons à vis. Dans les bordages et le caout-

chouc sont percées des ouvertures un peu plus grandes que les bouts du canal.

En serrant les boulons à vis, on peut fermer parfaitement la cellule sans faire usage d'aucune espèce de ciment.

Les parties ombrées représentent les conducteurs. Celui du bas est une large et épaisse plaque de laiton reposant sur le fond de la cellule ; celui du dessus est une plaque plus étroite, soutenue par des règles de verre, auxquelles elle est attachée par des vis à tête sphérique. Les deux plaques occupent toute la longueur du canal, soit $3 \frac{4}{16}$ pouces (0^m,10).

Les lignes pointillées de la figure 362 représentent trois trous forés. Les fils de communication avec la plaque supérieure et la plaque inférieure passent respectivement par le forage vertical et par le forage étroit de droite.

Le forage large de gauche sert à remplir et à vider la cellule.

EFFETS CHROMATIQUES

Dans un travail préliminaire fait avec cet appareil, on a observé de beaux effets de coloration, dont le D^r Kerr rend compte ainsi qu'il suit :

« Ici, comme dans les expériences suivantes, la cellule est remplie d'un demi-litre environ de sulfure de carbone bien clair. On n'emploie pas d'autres appareils optiques que la cellule et deux Nicols.

» Un faisceau de lumière, provenant d'un nuage brillant, est réfléchi horizontalement dans la salle à travers une ouverture pratiquée dans le volet, traverse le premier Nicol, tombe normalement sur la lame liquide, puis sur le Nicol analyseur. La hauteur et la direction des pièces sont réglées de façon que l'observateur placé au polariscope

puisse regarder facilement à travers la fente profonde qui sépare les deux conducteurs dans le vase. Je répète que les dimensions de cette fente sont environ un douzième de pouce ($0^m, 0021$), un pouce ($0^m, 0254$), et quatre pouces ($0^m, 1016$), la première de ces dimensions étant dans le sens de la verticale comme les lignes de force, et les deux autres étant horizontales, comme la ligne de visée. Les deux Nicols sont fixés, le premier avec la section principale à 45° sur la verticale, le second à l'extinction, qui est ici très nette. Des fils mettent en communication permanente le conducteur inférieur avec la terre, et le bouton extérieur du conducteur supérieur avec le conducteur principal de la machine. Pour rendre plus régulière et plus distincte la marche du phénomène optique, la cellule est reliée d'une façon permanente au bouton d'une bouteille de Leyde, dont l'armature extérieure est à la terre.

» Quand la machine est mise en mouvement à une allure modérée, le potentiel du conducteur supérieur s'élève lentement, et l'espace noir compris entre les deux conducteurs s'éclaire, la lumière passant graduellement par le noir impur, le gris bleu pâle, le blanc pâle, et ainsi de suite jusqu'à un blanc sensiblement pur et brillant. Jusqu'ici, il n'y a rien de nouveau, si ce n'est que le plus haut potentiel atteint est encore relativement bas, tandis que l'effet optique est très considérable et dépasse déjà de beaucoup ce qu'il est possible de neutraliser avec un compensateur de verre déformé à la main.

» Si le potentiel du conducteur principal continue à croître, le polariscope donne une belle progression d'effets chromatiques, qui suit d'une manière régulière et continue une certaine partie de l'échelle de Newton. La bande

lumineuse comprise entre les conducteurs passe d'abord du blanc au jaune paille brillant, puis se fonce graduellement en un jaune riche, passe par l'orangé au brun foncé, à un rouge pur et éclatant, au pourpre, au violet foncé, à un bleu riche et plein, et enfin au vert. Toutes ces couleurs sont remarquables par leur pureté et leur éclat, et sont certainement comparables à celles que l'on obtient en examinant des cristaux au polariscope.

» Généralement, vers le dernier des points nommés dans l'échelle des couleurs, à l'instant ou près du vert de la seconde série, le phénomène se termine par une décharge disruptive à travers le liquide. Quelquefois, mais rarement dans mes expériences, le phénomène se terminait plus tôt, pour suivre son cours régulier dans l'essai suivant. Cette irrégularité paraît due à ce que la décharge aurait été hâtée accidentellement par l'action de parties solides et d'impuretés dans le liquide.

» Dans toute l'étendue de ces phénomènes, depuis le bleu pâle ou le noir impur de la première série jusqu'au vert de la seconde, la lame liquide chargée électriquement agit régulièrement comme un cristal uniaxe, comme une lame de quartz dont l'axe optique est parallèle aux lignes de force, la lame augmentant d'épaisseur d'une façon continue et très rapide, à mesure que le potentiel s'élève. »

..... INSTRUMENTS (suite) — ÉLECTROMÈTRE

« Pour mesurer le potentiel, on employait un électromètre de Thomson à longue course.

C'est une modification de l'électromètre absolu décrit dans le vol. I, p. 87 (1).

(1) Voir Thomson, *Electro-statics and Magnetism*, § 363, p. 306.

LE COMPENSATEUR DE JAMIN

Pour mesurer l'effet optique, on se servait d'un compensateur de Jamin (1). Il consiste en deux cristaux de quartz (fig. 363), coupés suivant deux prismes ABC, DCB. La lumière le traverse dans la direction MN. L'axe d'un des

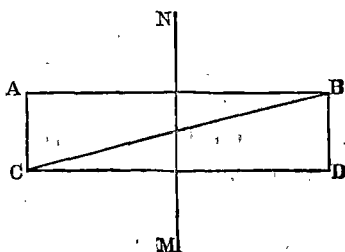


Fig. 363.

cristaux est dans le plan du papier, l'autre lui est perpendiculaire.

L'un des prismes est fixé dans un tube ; l'autre peut être déplacé au moyen d'une vis micrométrique.

On voit dans le champ visuel des bandes noires : en tournant la vis, on change le retard et les bandes noires se déplacent.

Un fil de soie fin est tendu, à travers le champ visuel.

On règle une des bandes sur le fil, et on note sur l'échelle du micromètre le nombre de divisions dont il est nécessaire de mouvoir la vis micrométrique pour amener l'autre bande sur le fil.

On peut calculer la différence de retard correspondant à la différence d'écartement des bandes, et on peut ainsi

(1) Jamin, *Cours de physique*, tome III, p. 622-639.

calculer la différence de retard correspondant à une division de l'échelle.

Le compensateur est placé sur le trajet du rayon qui a traversé la cellule électro-optique, et il est réglé de façon qu'une des bandes noires soit sur le fil. On fait marcher la machine, la bande se déplace.

On tourne la vis du compensateur jusqu'à ce que la bande revienne à sa position primitive, et le nombre de divisions de l'échelle dont elle a été déplacée donne le retard causé par la déformation électrique.

Des observations simultanées de l'électromètre et du compensateur donnent le retard produit pour des diffé-

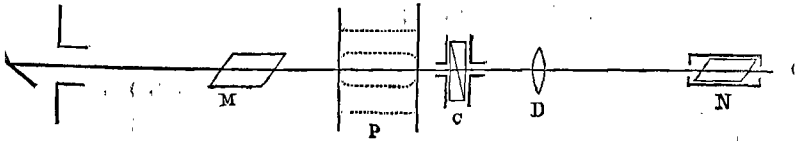


FIG. 364.

rences de potentiels variées. La fig. 364 est la disposition générale de l'appareil.

B est un miroir qui renvoie la lumière dans l'appareil, MN sont les Nicols, P la cellule, C le compensateur, D une lentille, et Q la position de l'œil de l'observateur.

CALCUL

Soient V la différence des potentiels mesurée à l'électromètre, D la distance des plaques, R la force électrique résultante, Q la quantité d'effet optique.

Nous savons que pour un champ peu étendu, et pour les parties éloignées des bords, R est proportionnel à V et

inversement proportionnel à D , et nous pouvons écrire :

$$R = \frac{V}{D}.$$

Mais nous avons vu que

Q est proportionnel à R^2 ,

ou bien

$$Q \text{ proportionnel à } \frac{V^2}{D^2}. \quad (1)$$

Si on calcule par cette formule les valeurs de Q , l'accord ou le désaccord des résultats trouvés avec les valeurs observées de Q sera une vérification de l'exactitude de la loi énoncée à la page 579.

Les résultats suivants ont été obtenus avec différents potentiels et différents écartements des plaques :

D mesuré.....	1	2	2	3	3	4	4
V mesuré.....	60	90	120	90	120	120	150
Q mesuré.....	63	36	64	16	27	15	24
Q calculé.....	63,1	35,5	63,1	15,8	28	15,8	24,6

Tout autre commentaire serait superflu. La « loi électro-optique de Kerr » est entièrement établie (1).

Le Dr Kerr termine son mémoire comme il suit :

« En définitive, je remarque que le principal résultat que j'ai obtenu, ce que j'ai appelé la loi des carrés, peut s'énoncer correctement sous plusieurs formes très différentes. La quantité de l'effet optique, par unité d'épaisseur du diélectrique, varie soit :

(1) Le mémoire relate une expérience qui prouve que les effets ne sont pas altérés quand le signe de V change et que sa valeur numérique reste constante.

» 1° Directement comme le carré de la force électrique résultante, ou bien

» 2° Directement comme l'énergie du champ électrique par unité de volume, ou bien

» 3° Directement comme l'attraction mutuelle des deux conducteurs qui limitent le champ, ou bien

» 4° Directement comme la *tension électrique* du diélectrique, quantité dont, il y a longtemps, Faraday a eu la conception très nette, et que le prof. Maxwell a ensuite introduite, en la précisant, dans la théorie mathématique de l'électricité.

» Les vues de Faraday et de Clerk Maxwell sur l'action du diélectrique dans la transmission de la force électro-statique, et sur l'état d'équilibre moléculaire forcé qui accompagne cette action et qui en est l'essence, reçoivent une confirmation très forte de ces nouveaux phénomènes d'électro-optique. L'action dioptrique d'un milieu chargé électriquement est en relation étroite avec la force qui produit la déformation électrique de ce milieu : dans tous les cas, l'axe de double réfraction coïncide avec la ligne de tension électrique, et l'intensité de la double réfraction dans le sulfure de carbone, et probablement dans tous les autres diélectriques, varie simplement en raison directe de la tension. »

Il est impossible de concevoir une démonstration, plus complète que celle qui est fournie par les expériences du D^r Kerr, de ce fait que l'induction électrique est un « état de déformation » du diélectrique.

CHAPITRE XLVIII

DÉCOUVERTES DU D^r KERR (suite)

ROTATION DU PLAN DE POLARISATION DE LA LUMIÈRE RÉFLÉCHIE SUR LE PÔLE D'UN AIMANT

Le D^r Kerr a fait une autre remarquable découverte (1).
Il a trouvé que :

« Lorsque de la lumière polarisée est réfléchie régulièrement sur l'un des pôles d'un électro-aimant de fer, le plan de polarisation tourne d'un angle sensible en sens inverse de la direction nominale du courant qui produit l'aimantation ; en sorte que le pôle réellement Sud (celui qui se dirige vers le Nord) d'un aimant de fer poli, agissant comme réflecteur, fait tourner à droite le plan de polarisation. »

Voici la disposition de l'expérience :

L (fig. 365) est la source de lumière,

E l'œil de l'observateur,

A et B, le premier et le second Nicols,

C, un coin de fer doux.

La lumière est réfléchie par un pôle parfaitement poli d'un aimant en fer à cheval.

Le premier Nicol est disposé de façon que le plan de polarisation soit parallèle ou perpendiculaire au plan d'in-

(1) *Phil. Mag.*, mai 1877.

cidence, car autrement la lumière serait polarisée elliptiquement par la réflexion.

On a reconnu toujours nécessaire d'employer ce que le Dr Kerr appelle un « sous-aimant, » c'est-à-dire un coin de fer

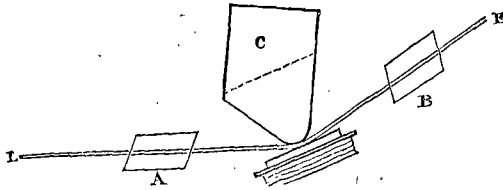


FIG. 365.

doux (C), tenu par des cales en bois à une distance d'environ $1/20$ de pouce ($1^{\text{mm}},27$) de la surface du fer, de façon à laisser juste le passage de la lumière. Le Dr Kerr croit que le sous-aimant n'a pas d'autre action que de concentrer davantage la force magnétique sur le miroir de fer. Mais ce point demande à être étudié davantage.

Dans tous les cas d'incidence oblique, on a reconnu que l'effet sur le polariscope était mêlé et dû en partie à la force magnétique, en partie à la réflexion métallique. L'effet de cette réflexion était de transformer la lumière polarisée rectilignement en lumière polarisée plus ou moins elliptiquement, et qu'on ne pouvait par suite éteindre par la rotation du second Nicol.

Afin d'obtenir uniquement l'effet magnétique, le Dr Kerr s'est arrangé pour avoir une incidence normale au miroir, comme le montre la fig. 366. Le sous-aimant C est perforé, et la lumière est renvoyée en bas sur le pôle poli F au moyen d'une glace sans tain M, à travers laquelle passe la lumière réfléchie pour aller par le deuxième Nicol en E.

Avec cette disposition, on voit seule et très distincte la

rotation due à la force magnétique. L'aimant que l'on employait consistait en un noyau de 2 pouces de diamè-

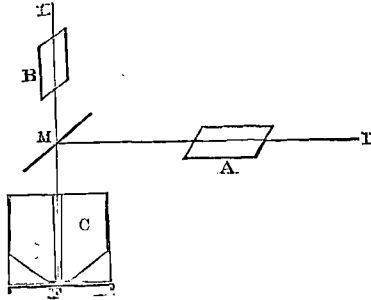


FIG. 366.

tre ($0^m, 051$), et de 10 pouces de long ($0^m, 254$), recouvert de 400 tours de fil. On l'actionnait avec six petits éléments de Grove. Les rotations étaient très faibles.

Rien n'est cependant plus concluant que le mémoire du D^r Kerr. Il semble répondre par avance à tous les doutes que l'on pourrait élever sur la réalité du phénomène (1).

Ce que l'on connaît jusqu'ici sur les lois de ces nouveaux phénomènes n'est pas suffisant pour nous permettre d'en discuter la théorie.

RÉPÉTITION DES EXPÉRIENCES

L'auteur a répété les expériences du D^r Kerr, en employant un cylindre de fer de $0^m, 70$ de long, et de $0^m, 057$

(1) Le phénomène n'est sûrement pas une rotation par l'air, qui n'aurait pas encore été remarquée. Non seulement toutes les expériences contredisaient cette hypothèse, mais dans une observation directe que j'ai faite, j'ai vu un aimant, qui donnait une double rotation de $7'$ à la lumière réfléchie sur son pôle, rester sans effet aucun sur de la lumière passant sans se réfléchir à travers ses pôles percés. Or un effet dû à une rotation par l'air eût été dans ce cas quatre fois plus grand qu'avant, ou environ $28'$.

de diamètre, sur lequel étaient placées les deux hélices de l'électro-aimant décrit vol. II, p. 52.

Pour mesurer la rotation, on employait l'analyseur de Jellett (vol. II, p. 547).

On a obtenu les lectures suivantes pour le plan de polarisation :

Courant direct.	Courant inverse.
271° 55'	271° 30'
271° 57'	271° 27'
271° 54'	271° 28'
271° 52'	271° 26'
Moyenne du double de la rotation.	26' 45''

Jusqu'à présent, je n'ai pas réussi à obtenir d'effet distinct sans le sous-aimant. Tant que ce résultat n'aura pas été obtenu, il ne sera pas possible d'avoir une mesure « absolue » de la grandeur de la rotation produite par un pôle de force donnée.

LUMIÈRE RÉFLÉCHIE SUR LE CÔTÉ D'UN AIMANT

Le Dr Kerr a trouvé (1) que le plan de polarisation de la lumière tourne aussi quand on la réfléchit sur le côté d'un aimant.

La fig. 367 représente le plan de l'appareil.

Un bloc de fer AB est posé sur les pôles d'un aimant en fer à cheval. L est la lampe, P un écran métallique avec une fente, C le point où se fait la réflexion, NN' les Nicols, E l'œil de l'observateur.

On a reconnu que les seules positions des Nicols qui donnent des extinctions nettes sont celles où la section

(1) *Phil. Mag.*, 1878, 1, p. 161.

principale du premier est parallèle ou perpendiculaire au plan d'incidence.

Le Dr Kerr a trouvé que, quand l'électro-aimant est excité, il se produit une rotation dans un sens lié à celui

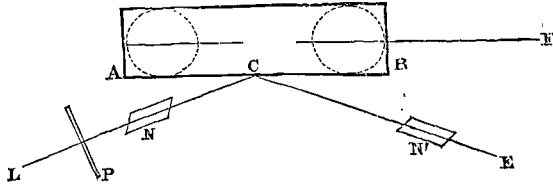


Fig. 367.

du courant magnétisant par une relation qui dépend de l'angle et du plan d'incidence.

Première expérience. — Plan de polarisation du premier Nicol parallèle au plan d'incidence. Le plan de polarisation tourne dans le même sens que le courant magnétisant.

Par « angle d'incidence » on entend la moitié de l'angle LCE (fig. 367).

« L'intensité des effets optiques de la magnétisation varie très notablement avec l'angle d'incidence. Pour des incidences voisines de 85 degrés, l'effet est très faible, mais parfaitement régulier et plus net qu'il n'est nécessaire pour le constater sûrement ; vers les incidences de 75 degrés, il est plus distinct et sensiblement plus fort ; vers 60 et 65 degrés, il est relativement net et fort, bien plus fort qu'à 75 degrés ; vers l'incidence de 45 degrés, il est encore assez fort, mais sensiblement plus faible qu'à 60 degrés ; vers l'incidence de 30 degrés, il est de nouveau très faible, à peu près comme à 85 degrés. »

Deuxième expérience. Plan de polarisation du premier Nicol perpendiculaire au plan d'incidence.

Vers l'incidence de 85 degrés, l'effet est exactement le même que dans la première expérience; ensuite il diminue et disparaît à peu près complètement vers 75 degrés. Au delà de 75 degrés, il commence à reparaitre, mais la rotation est dans l'autre sens; pour l'incidence de 60 degrés, l'effet est relativement net et fort, quoique sensiblement moindre que celui obtenu dans la première expérience pour la même incidence; vers 30°, il est faible, mais distinct, et plus fort que l'effet contraire obtenu à 85 degrés.

RÉSUMÉ.

Ainsi, lorsque le plan de polarisation est parallèle au plan d'incidence, la rotation est, pour toutes les incidences, dans la direction du courant magnétisant.

Lorsqu'il lui est perpendiculaire, la rotation est dans le sens du courant pour des incidences comprises entre 85 degrés et 75 degrés, et en sens contraire pour des incidences comprises entre 75 degrés et 30 degrés.

Dans ces expériences, on n'emploie pas de sous-aimant.

CHAPITRE XLIX

SÉLÉNIUM.

La seule action directe de la lumière sur l'électricité qu'il reste à mentionner est le changement du pouvoir conducteur du sélénium sous l'influence de la lumière. Le sélénium est un très mauvais conducteur : sa résistance est environ $3,8 \times 10^{10}$ fois celle du cuivre; mais on a reconnu que, quand on l'expose à la lumière, sa résistance change (1).

(1) *Propriétés du sélénium.* — Le sélénium se présente soit à l'état vitreux ou amorphe, soit à l'état cristallin. Dans le premier état, c'est un corps isolant; dans le second, c'est un conducteur médiocre. Quand on fond du sélénium et qu'on le laisse refroidir, il est à l'état vitreux; en chauffant doucement le sélénium vitreux vers 96°, sa température s'élève tout d'un coup et arrive rapidement à 217°, sans que la fusion ait lieu; il prend alors l'état cristallin et a l'aspect métallique. Sa résistance électrique décroît jusqu'au point de fusion, puis augmente brusquement quand il passe à l'état liquide. Exposé au soleil, le sélénium passe d'une de ses formes allotropiques à l'autre.

M. Willoughby Smith se servit de crayons de sélénium pour la construction de grandes résistances électriques; il observa, avec son aide, M. May, que la résistance du sélénium était plus faible à la lumière que dans l'obscurité (1873). Le sélénium fut entouré d'eau pour vérifier que ce n'était pas un effet de température et, même dans ces conditions, avec un circuit composé d'une pile, du crayon de sélénium et d'un galvanomètre, l'approche d'une bougie suffisait pour augmenter la déviation de l'aiguille. MM. Sales et Adams soumettent le sélénium aux différentes radiations spectrales. M. Sales trouva que le maximum d'effet correspondait au maximum de température, mais M. Adams trouva qu'il correspondait au maximum de lumière (entre le jaune et le vert). Lord Rosse plaça dans des conditions identiques un crayon de sélénium et une pile thermo-électrique : en les soumettant à la chaleur obscure émanant de corps chauffés, le galvanomètre montrait que la pile seule était influencée; en interposant une cuve d'alun sur le trajet d'une source lumineuse pour arrêter les rayons calorifiques, le sélénium seul

Le professeur Adams a trouvé (1) que *le changement dans la résistance du sélénium est proportionnel à la racine carrée du pouvoir éclairant.*

Le 18 mai 1876, le prof. Adams et M. R. E. Day communiquèrent à la Société Royale un mémoire contenant les résultats d'une année d'expériences sur le sélénium. Les extraits suivants de ce mémoire résument ce que l'on sait aujourd'hui sur ce sujet :

« On a observé que, pour un même échantillon de sélénium à la même température, la résistance diminue quand la puissance de la pile augmente. On a trouvé aussi que la résistance d'un barreau de sélénium n'est pas la même quand les courants le traversent dans des directions différentes. Par exemple, si deux fils de platine sont noyés à chaud dans du sélénium, aux points A et B, et que l'on établisse l'équilibre électrique dans un pont de Wheatstone, comprenant cette résistance de sélénium, le pôle positif de la pile étant relié à l'électrode A; si ensuite on renverse le courant de façon que le pôle négatif de la pile soit maintenant relié à l'électrode A, on trouve toujours une valeur numérique différente de la première pour la résistance qui établit l'équilibre.

» Il n'en serait point ainsi si la conductibilité électrique du sélénium suivait la loi ordinaire des conducteurs métalliques : il paraissait donc probable qu'une étude attentive de cette question conduirait à des résultats importants.

» Dans les expériences relatées dans ce mémoire, les auteurs ont eu surtout en vue :

» 1° D'étudier le caractère de la conductibilité du sélénium tenu dans l'obscurité;

» 2° De déterminer si la lumière peut donner réellement naissance à un courant dans le sélénium.

» On a préparé plusieurs fragments de sélénium de la manière suivante : un petit fragment, dont la longueur pouvait varier de 6^{mm},4 à 25^{mm},4, était détaché d'un barreau de sélénium vitreux. On prenait un fil de platine, on l'enroulait en forme de petit anneau

était influencé. M. Adams constata que la lumière de la lune agissait sur le sélénium. Enfin, M. Siemens construisit un photomètre fondé sur l'action de la lumière sur le sélénium.

J. R.

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. XXV, 1876, p. 113.

autour d'un de ses bouts, et on recourbait le reste du fil à angle droit sur cet anneau. On chauffait à la flamme d'une lampe à alcool les anneaux de deux fils ainsi disposés, et on les enfonçait dans les extrémités du petit cylindre de sélénium auquel on donnait ainsi des électrodes de platine. Le tout était ensuite recuit.

» On a fait d'abord quelques expériences préliminaires pour déterminer si le changement de résistance par inversion du courant avait quelque relation avec la position du sélénium ou le sens du courant par rapport au méridien magnétique. On a trouvé qu'il n'existe pas de relation de ce genre.

» Un grand nombre d'expériences ont été faites pour déterminer la diminution de résistance qui correspond à l'accroissement de la pile, et le changement de résistance dû à l'inversion du courant. On en a tiré les conclusions suivantes :

» 1° La résistance du sélénium diminue en général quand on augmente la pile ;

» 2° Si le premier courant envoyé à travers le sélénium est énergétique, il détermine un *arrangement* permanent des molécules ; il en résulte, dans les expériences suivantes, que le sélénium oppose plus de résistance à un courant de même sens que ce premier courant qu'à un courant qui le traverse en sens contraire.

» 3° Le passage du courant dans un certain sens produit un *arrangement* des molécules, qui facilite le passage d'un courant ultérieur de sens contraire, et contrarie un courant de même sens. Si donc, on envoie à court intervalle deux courants consécutifs dans le même sens, la résistance observée dans le second cas, même avec une pile plus forte, est souvent égale ou supérieure à la première résistance obtenue.

» Les résultats de ces expériences semblent indiquer que la conductibilité du sélénium est électrolytique. On a entrepris une série d'expériences pour reconnaître si, après le passage d'un courant dans un fragment de sélénium, on pouvait y distinguer quelque indice de polarisation. On a trouvé que si on fait passer quelque temps le courant d'une pile voltaïque dans un fragment de sélénium, que l'on détache ensuite les électrodes de la pile, et qu'on les relie à un galvanomètre, le galvanomètre est traversé par un courant, quelquefois très intense, de sens contraire au courant de la pile. Ce qui prouve que le passage du courant de la pile détermine une polarisation dans le sélénium.

» Tous les résultats décrits jusqu'à présent ont été obtenus avec du sélénium tenu dans l'obscurité. »

Les auteurs ont cherché ensuite à découvrir si, en exposant le sélénium à la lumière pendant le passage du courant de polarisation,

il se produit un changement dans l'intensité de ce courant. Dans un certain nombre de cas, ils ont observé un changement distinct : la plupart du temps, l'action de la lumière favorise le passage du courant ; dans un cas, ils ont trouvé que l'action de la lumière, non seulement ramenait à zéro la déviation du galvanomètre, mais encore produisait une déviation considérable de l'autre côté.

« Ce résultat s'expliquait en admettant que la *lumière développe effectivement* dans le sélénium *une force électro-motrice*, qui dans ce cas aurait été de sens contraire à la force électro-motrice de polarisation et susceptible de dépasser cette dernière.

» La question se présentait aussitôt de savoir si l'on pourrait *produire un courant dans le sélénium par la seule action de la lumière*. En conséquence, on relia au galvanomètre le même fragment de sélénium. Tant qu'il n'était pas éclairé, il n'y avait aucune action ; mais, en exposant le tube à la lumière d'une bougie, on constata une déviation énergique de l'aiguille du galvanomètre. Cette déviation retombe immédiatement à zéro, en interposant un écran devant la lumière.

» Cette expérience a été répétée de diverses manières et avec différentes sources de lumière ; les résultats prouvent clairement que *la seule action de la lumière suffit pour développer et maintenir un courant électrique dans le sélénium*.

» Tous les fragments de sélénium employés jusqu'à ce moment avaient été fréquemment traversés par des courants électriques. Il parut désirable d'essayer l'effet de la lumière sur des morceaux de sélénium qui n'avaient pas encore été traversés par des courants électriques.

» En conséquence, on prépara trois fragments aussi semblables que possible, et on les fit recuire. En les essayant, on trouva que deux d'entre eux étaient sensibles à l'action de la lumière, c'est-à-dire que la lumière, en tombant sur eux, produisait un courant électrique. Mais le troisième morceau ne donna pas trace de sensibilité. Il ressort de là que trois morceaux, pris sur la même pièce, de même longueur, recuits ensemble, peuvent, par suite de quelque légère différence dans leur état moléculaire, présenter une différence considérable dans leur sensibilité à l'action de la lumière.

» Dans les expériences qui ont donné les résultats précédents, le morceau de sélénium était toujours exposé tout entier à l'action de la lumière, en sorte qu'il n'était pas possible de savoir si une partie du morceau était plus sensible qu'une autre. »

Pour examiner plus complètement ce point, les auteurs ont employé « la lumière Drummond, et, au moyen d'une lentille, faisaient

converger la lumière en un foyer situé sur la plaque de sélénium au point que l'on voulait examiner; une cellule de verre à faces parallèles, remplie d'eau, était interposée sur le trajet du faisceau et aidait à absorber les rayons calorifiques obscurs.

» Les résultats de ces expériences ont établi nettement les points suivants :

» 1° Les fragments de sélénium recuit sont en général sensibles à la lumière, c'est-à-dire que, sous l'action de la lumière, il s'établit entre les molécules une différence de potentiel qui peut, dans de certaines conditions, produire un courant électrique à travers la substance;

» 2° La sensibilité est différente aux différents points de la même pièce;

» 3° En général, le courant va de la partie la moins éclairée à la partie la plus éclairée du sélénium; mais des différences accidentelles dans l'arrangement moléculaire peuvent faire que cette direction soit renversée.

» Les courants produits dans le sélénium par l'action de la lumière ne ressemblent pas aux courants thermo-électriques dus à l'échauffement des soudures entre l'électrode de platine et le sélénium; car, dans bien des cas, le courant produit avait sa plus grande intensité lorsque la lumière était concentrée sur des points du sélénium ne coïncidant pas avec les soudures; en outre, le courant se produit soudainement quand on expose la substance à la lumière; et l'aiguille retombe brusquement à zéro, quand on masque la lumière; l'action graduelle due au refroidissement graduel de la soudure faisait totalement défaut.

» Quand la lumière tombe sur une soudure, le courant va du sélénium au platine à travers la soudure, ce qui n'est pas d'accord avec la place assignée au sélénium dans la série thermo-électrique des métaux.

» On a ensuite fait des expériences pour déterminer l'effet produit sur l'intensité d'un courant qui traverse un morceau de sélénium tenu dans l'obscurité, quand on fait tomber un faisceau de lumière sur un morceau de sélénium.

» Voici les résultats obtenus dans ces expériences :

» Avec des morceaux de sélénium de faible résistance et traversés par un courant faible,

» 1° Quand la lumière tombe sur le bout du barreau de sélénium par lequel entre le courant venant du pôle positif de la pile, elle *contrarie* le passage du courant;

» 2° Quand elle tombe sur le bout par lequel le courant sort du métal, elle *favorise* son passage.

» Avec des morceaux de sélénium présentant une grande résistance, on a trouvé que dans tous les cas la lumière facilite le passage du courant de la pile, quelle que soit sa direction.

» On a aussi reconnu que dans les morceaux qui paraissent trop peu sensibles à l'action de la lumière pour produire un courant par eux-mêmes quand ils sont éclairés, l'action de la lumière facilite le passage à travers le sélénium de courants dus à une force électro-motrice extérieure.

» Les résultats des expériences décrites dans ce mémoire fournissent une explication admissible du genre d'action qui se produit quand de la lumière tombe sur un morceau de sélénium plus ou moins cristallisé.

» Si, après avoir chauffé un bâton de sélénium vitreux à son point de ramollissement, on pouvait refroidir toute sa masse également et très lentement, toutes les molécules de la masse pourraient prendre leur position naturelle de cristallisation ; toute la masse serait dans un état cristallin parfait, et conduirait également bien l'électricité et la chaleur en tous ses points. Mais, par la nature même de l'opération, il est évident que les parties extérieures se refroidissent le plus vite, et que nous aurons, en passant de l'extérieur au centre, une série de couches dans un état de cristallisation de plus en plus parfait.

» La lumière, nous le savons par l'exemple de certains corps, tend à favoriser la cristallisation ; et quand elle tombe sur la surface d'un bâton de sélénium dans cet état, elle tend probablement à favoriser la cristallisation dans les couches extérieures, et par suite à produire du dedans au dehors un flux d'énergie qui, dans le cas du sélénium et dans de certaines circonstances, paraît produire un courant électrique.

» La cristallisation produite dans le sélénium par la lumière peut aussi rendre compte de la diminution de résistance du sélénium quand il est traversé par le courant d'une pile ; car, en passant à l'état cristallin, le sélénium devient meilleur conducteur de l'électricité. »

* PHOTOPHONE DE BELL

Les expériences de M. Adams suggérèrent à M. Bell l'idée qu'en faisant varier l'intensité de la lumière tombant sur le sélénium et en étudiant la conductibilité du sélénium, non point avec le galvanomètre, mais avec le téléphone, on entendrait les sons du téléphone. Les lois de la production des sons dans le téléphone sont les mêmes que les lois de l'induction : le téléphone ne rend pas de sons quand

il est traversé par un courant continu, il ne rend un son que s'il se produit un changement dans l'intensité du courant. Il en résulte que si l'on fait tomber un rayon de lumière sur un morceau de sélénium relié à une pile et à un téléphone, il ne se produit aucun effet tant que l'intensité lumineuse reste la même ; mais, du moment que l'intensité lumineuse varie, la résistance du sélénium varie également ; par suite, l'intensité du courant électrique qui traverse le sélénium varie aussi et fait varier le pouvoir magnétique de l'aimant dans le téléphone. La membrane de fer est attirée ou relâchée et produit un son. *Si les variations que l'on produit dans l'intensité du rayon de lumière, et partant dans celle du courant électrique, correspondent aux variations de pression dans l'air, produites par l'émission d'un son, le téléphone donnera une reproduction exacte de ce son.*

Telles sont les considérations qui ont conduit M. Bell et son collaborateur M. Tainter, à la découverte de l'instrument qu'ils ont appelé *photophone*, parce qu'il sert à transmettre les sons par l'intermédiaire d'un rayon lumineux. Tandis que le téléphone ordinaire nécessite des fils conducteurs pour relier les deux stations en correspondance, le photophone exige simplement qu'un faisceau lumineux traverse, sans être intercepté, l'espace qui sépare les deux stations, et si cet instrument réalise les espérances qu'il fait naître, il suffira de se voir pour pouvoir se parler.

Pour rendre sensibles les propriétés du sélénium, M. Bell imagina l'expérience suivante : Un crayon de sélénium est traversé par le courant d'une pile et un téléphone est intercalé dans le circuit. On fait tomber sur le sélénium un rayon de lumière éclipsé un grand nombre de fois dans l'espace d'une seconde, autrement dit une succession d'émissions lumineuses très rapprochées : c'est ce que M. Bell appelle un *rayon vibratoire*. Chaque émission cause une variation dans la résistance du sélénium et par suite dans l'intensité du courant qui le traverse ; le téléphone placé dans le circuit subit des variations d'aimantation correspondantes. Si l'on produit ainsi 435 éclairs par seconde, il y aura 435 variations de courant et la membrane du téléphone exécutera 435 vibrations, c'est-à-dire la note *la* du diapason. On pourra donc ainsi transmettre les sons musicaux.

La fig. 368 représente la disposition de l'expérience (1).

Au poste de départ, un faisceau de rayons parallèles, réfléchi par un miroir M, est concentré par une lentille L' en un foyer où il rencontre un disque DD, percé d'une série de trous ou fentes, disposés

(1) Cette figure et les deux suivantes sont empruntées au journal *la Lumière électrique*.

en cercle près des bords, comme un disque de sirène ou de phénakistoscope. Quand ce disque, figuré en plan au-dessous, tourne, le faisceau passe ou est intercepté, suivant qu'il rencontre un trou ou un intervalle plein. A leur sortie, ces rayons sont reçus sur une autre lentille L' , qui les rend de nouveau parallèles, afin de leur permettre

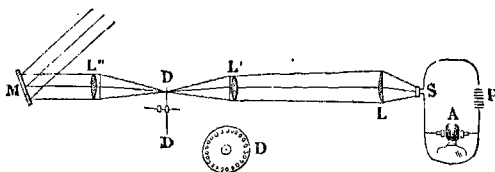


FIG. 368.

d'atteindre, avec le moins de perte possible, le poste récepteur. Dans ce dernier, une nouvelle lentille L les fait converger au point S où se trouve le sélénium, qui fait partie du circuit formé par la pile P et l'appareil téléphonique. En faisant tourner rapidement le disque perforé, l'observateur placé en A , avec un téléphone à chaque oreille, entend le son correspondant aux vibrations produites.

Quand on se sert de la lumière solaire, M est le miroir d'un héliostat qui renvoie le faisceau dans une direction fixe; si on emploie la lumière électrique, l'arc voltaïque est placé au foyer d'un réflecteur parabolique qui réfléchit les rayons en faisceau parallèle sur la lentille L'' . Avec la lumière solaire, M. Bell a pu percevoir des sons musicaux dans un récepteur placé à plus de 2 kilomètres de l'appareil transmetteur.

La fig. 369 représente la disposition employée pour correspondre au moyen de la parole. Le transmetteur se compose d'une embouchure obturée par une feuille très mince de verre A , formant miroir (ou par un miroir métallique de 1 millimètre d'épaisseur au plus), et encastrée à la façon des membranes téléphoniques. Sous l'influence des vibrations de l'air produites par la parole, ce miroir mince se bombe ou se creuse, devient convexe ou concave et, si un faisceau lumineux est concentré sur ce miroir par la lentille B , il sera réfléchi en faisceau divergent ou convergent. L'intensité lumineuse qu'il projette à distance sur une surface donnée changera à chaque instant. Le récepteur de sélénium E , placé au foyer du réflecteur D , éprouvera des variations de résistance correspondant à celles de la pression de l'air dans le transmetteur; la parole sera donc reproduite par le téléphone G , placé dans le circuit de la pile F et du sélénium E .

On peut arrêter les rayons calorifiques en interposant une cuve d'alun entre l'héliostat et le miroir.

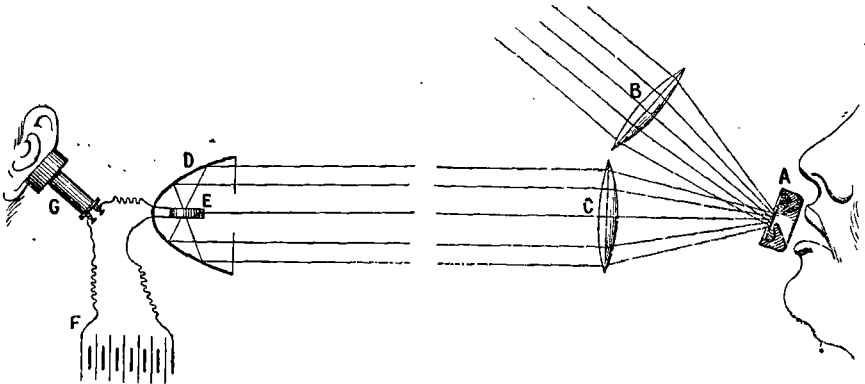


FIG. 369.

Récepteur de sélénium. — Le sélénium, employé comme récepteur, doit offrir à la lumière une surface aussi grande que possible, tout en présentant une résistance assez faible au courant électrique qui le traverse. M. Siemens a employé soit la forme de *grille*, soit celle de *spirale*. Dans la première, le sélénium sépare deux fils de platine formant des zigzags parallèles; ces fils servent d'électrodes et, par leur grande longueur, réduisent la résistance du système. Dans la seconde, les deux fils de platine sont enroulés ensemble de façon à former une spirale double sur laquelle on place une bande de sélénium fondu. Le tout est disposé entre deux plaques de mica et pressé après avoir été recuit.

MM. Bell et Tainter donnent à leurs récepteurs soit la forme plane, soit la forme cylindrique. Le récepteur *plan* se compose de deux plaques de cuivre séparées par du mica; la plaque supérieure est criblée de trous coniques et la plaque inférieure porte des pointes qui pénètrent dans ces trous sans toucher leurs bords. L'espace annulaire compris entre les pointes et les bords des trous est rempli de sélénium. Le courant arrivant par la plaque inférieure s'épanouit dans les pointes et passe à la plaque supérieure par les anneaux de sélénium. Le rapport de la surface du sélénium à la surface totale du disque est 0,11. En chauffant doucement, pour amener le sélénium à l'état cristallin, et laissant refroidir, on obtient un récepteur dont la résistance est de 300 ohms dans l'obscurité et de 150 ohms au jour.

Le récepteur *cylindrique* se compose d'une pile de disques de cuivre, séparés par des disques de mica d'un diamètre un peu plus petit. On a ainsi une série de sillons annulaires dont les côtés sont formés par deux rebords de cuivre et dont le fond est la tranche du disque de mica. On chauffe cette pile à la température où le sélénium commence à fondre, et on frotte alors sa surface avec un crayon de sélénium, de manière à remplir les cavités annulaires. On fait communiquer les disques pairs ensemble, et les disques impairs ensemble; les uns sont attachés au pôle $+$ et les autres au pôle $-$ de la pile. Le courant doit traverser ainsi les couches de sélénium. On recuit ensuite l'élément au four à gaz jusqu'à ce que le sélénium, qui était amorphe et noir, prenne l'aspect métallique: on éteint le gaz dès qu'il donne des traces de fusion et on laisse refroidir. On a ainsi un récepteur dans lequel le rapport de la surface du sélénium à la surface totale du cylindre est 0,60 et dont la résistance est de 1200 ohms dans l'obscurité et 600 à la lumière du jour. Le récepteur plan s'emploie quand le faisceau lumineux qui arrive sur lui est bien cylindrique; son diamètre doit être égal à celui du faisceau. Quand le faisceau est très large ou un peu dispersé, ce qui est le cas le plus ordinaire, il est préférable d'employer le récepteur cylindrique que l'on place au foyer d'un grand récepteur parabolique, fig. 369, afin de recueillir tous les rayons et de les ramener sur la surface du récepteur.

* Radiophonie.

Reprenons l'expérience de la fig. 368, supprimons le sélénium, le téléphone et la pile, et remplaçons le sélénium par une feuille d'ébène, de zinc ou même de toute autre substance: on perçoit encore un son distinct, mais plus faible que dans le cas précédent. Dans la fig. 370,

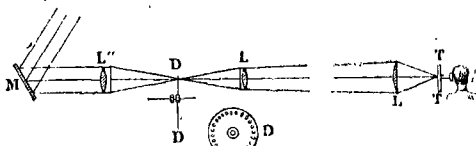


FIG. 370

TT est une de ces feuilles fermant l'orifice d'un tube dont l'autre extrémité est maintenue contre l'oreille. On peut même recevoir directement dans l'oreille le rayon lumineux vibratoire et on entend

toujours la note. D'après des expériences faites à la Société physique de Londres, les rayons *invisibles* (rayons calorifiques) donnent aussi naissance à un son, mais à un degré moindre.

M. Mercadier (Journal *La Lumière électrique*, 1881, pp. 8, 37 et 51) a repris l'étude du phénomène qu'il appelle *radiophonie* et qui peut s'énoncer ainsi : *Un rayon lumineux, rendu intermittent, qui tombe sur une plaque mince appliquée contre l'oreille, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un tube en caoutchouc et d'un cornet acoustique, rend un son dont le nombre de vibrations est égal à celui des intermittences du rayon lumineux dans une seconde.*

Quand on emploie un disque métallique perforé, le frottement de l'air contre les ouvertures produit, quand on le fait tourner rapidement, un bruissement qui peut couvrir les sons quand ils sont faibles. Il est préférable d'employer un disque de verre plein qu'on recouvre d'une feuille de papier opaque, dans laquelle on découpe des ouvertures pour le passage des radiations. On peut en outre découper plusieurs séries d'ouvertures placées sur des circonférences concentriques ; chaque série a un nombre d'ouvertures différent, afin d'avoir soit des sons différents pour une même vitesse de la roue, en faisant passer les radiations *successivement* par les ouvertures de chaque série, soit des accords musicaux, en faisant passer un faisceau simultanément à travers plusieurs séries. Dans ce but, le support du disque tournant peut recevoir un mouvement vertical alternatif, qui fait passer le faisceau successivement à travers 4 séries, par exemple, comprenant respectivement 40, 50, 60 et 80 ouvertures, de façon à produire les sons successifs d'un accord parfait. Dans ces conditions, on ne peut plus confondre les sons radiophoniques avec des sons accidentels et étrangers.

Le récepteur le plus commode est un cornet téléphonique en bois, formé de deux parties qui entrent l'une dans l'autre à frottement, maintenant entre elles la lame en expérience. Un tube en caoutchouc relie ce cornet à un autre cornet acoustique en bois qu'on applique contre l'oreille.

M. Mercadier résume ses recherches comme il suit :

1° *La radiophonie ne paraît pas être un effet produit par la masse de la lame réceptrice vibrant transversalement dans son ensemble, comme une plaque vibrante ordinaire.* Car une lame quelconque reproduit également bien tous les sons successifs, des plus graves aux plus aigus, ainsi que les accords dans tous les tons possibles. En faisant varier l'épaisseur et la largeur des lames, les sons conservent toujours leur *hauteur* et leur *timbre* ; quant à leur intensité, dans les lames opaques, elle diminue avec l'épaisseur (aussi les meilleures

lames métalliques sont-elles des morceaux de clinquant), tandis que, dans les lames transparentes, elle ne varie pas sensiblement avec l'épaisseur, à égale surface éclairée. Une plaque fêlée ou fendue produit à peu près les mêmes effets que lorsqu'elle est intacte.

2° *La nature des molécules du récepteur ne paraît pas avoir un rôle prédominant.* Car, à épaisseur et surface égales, tous les récepteurs donnent des sons de même hauteur et de même timbre. L'effet produit par les radiations ordinaires est le même pour les diverses substances transparentes : verre, mica, spath d'Islande, gypse, quartz taillés parallèlement ou perpendiculairement à l'axe. Il en est de même pour les radiations polarisées, seulement l'intensité du son diminue en raison de l'affaiblissement du faisceau radiant qui a traversé le polariseur.

3° *Le phénomène semble résulter principalement d'une action exercée à la surface du récepteur.* Toute opération qui diminue le pouvoir réflecteur et augmente le pouvoir absorbant accroît l'intensité du son ; les surfaces ternes ou oxydées sont préférables aux surfaces polies. Une couche opaque de céruse, placée sur la lame, empêche la production du son ; une couche de noir de fumée renforce le son ; avec les corps opaques, cet effet ne se manifeste que si la lame est mince et la couche noire tournée vers les radiations. Les lames transparentes se conduisent comme les lames opaques, quand la couche noire est tournée vers les radiations, c'est-à-dire qu'il faut qu'elles soient minces pour avoir un effet sensible. Mais si la couche noire est tournée vers l'oreille, l'épaisseur de la lame semble indifférente, et les choses se passent comme si les radiations, traversant la lame, venaient agir sur la surface noircie. Ainsi, avec du verre ou du mica mince, il est indifférent de tourner la face noircie vers le disque ou vers l'oreille.

4° *Le phénomène dépend directement de la quantité de radiations reçues par le récepteur.* On vérifie, en effet, que l'on diminue l'intensité du son en diminuant la quantité des radiations reçues, à l'aide de diaphragmes. En polarisant les radiations et prenant pour récepteur un analyseur mince, comme une lame de tourmaline, et faisant tourner le polariseur ou l'analyseur, on remarque que les sons varient avec l'intensité des radiations, et que le son cesse dans les positions où l'intensité est nulle.

Au lieu de la lumière solaire ou de la lumière électrique, on peut employer la lumière Drummond, une lampe à pétrole, ou même un bec de gaz ; seulement, avec les sources faibles, l'emploi des lentilles de concentration nuit à l'intensité du phénomène, et il est préférable de faire agir directement la lumière sur la roue. On peut employer,

comme source lumineuse, une lame de platine chauffée par un bec Bunsen.

5° *Les sons radiaphoniques sont produits principalement par les radiations des grandes longueurs d'onde, dites calorifiques.* Car, en explorant un spectre de lumière électrique avec un récepteur en mica mince enfumé, par exemple, on n'obtient pas d'effet sensible du violet au jaune, tandis qu'on entend des sons d'intensité croissante de l'orangé au rouge et à l'infra-rouge. Le maximum est dans les radiations invisibles au delà du rouge; l'intensité décroît ensuite rapidement. Les radiations agissent donc surtout par leurs *propriétés thermiques*, et on vérifie en effet qu'on peut produire des sons à l'aide de radiations absolument invisibles dans l'obscurité. Pour cela, on chauffe, avec une flamme oxyhydrique, une des faces d'un disque de cuivre rouge de 2 millimètres d'épaisseur, dont l'autre face est placée devant les fentes de la roue interruptrice; le disque étant porté au rouge sombre, on entend les sons; on éteint la flamme, le disque, en refroidissant, continue à émettre des sons, d'intensité décroissante, mais encore sensibles quand le disque est déjà invisible dans l'obscurité.

Le phénomène serait donc, comme le *radiomètre* de Crookes, une transformation de l'énergie thermique des radiations.

CHAPITRE L

THÉORIE ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE LA LUMIÈRE DE CLERK-MAXWELL.

L'induction électrique est une déformation d'une certaine espèce ; et quand l'induction électrique se transmet à travers un espace où il n'y a pas de matière ordinaire, on est d'accord pour appeler un « éther » la chose inconnue qui remplit l'espace et transmet la déformation.

La lumière est une déformation d'une certaine espèce ; et lorsque la lumière se transmet à travers un espace où il n'y a pas de matière ordinaire, on est d'accord pour appeler un « éther » la chose inconnue qui remplit l'espace et transmet la déformation.

Tous les savants admettent que la lumière consiste en vibrations d'un éther ou fluide très subtil, qui remplit tout l'espace, et probablement pénètre tous les corps.

Voici, en quelques mots, la théorie du professeur Clerk Maxwell :

« L'induction électro-magnétique se propage à travers l'espace par les déformations ou vibrations du même éther qui transmet les vibrations lumineuses : en d'autres termes, la lumière n'est qu'un ébranlement (disturbance) électro-magnétique. »

Examinons les raisons qui nous portent à croire qu'il n'y a qu'un seul et même éther à la fois lumineux et électro-magnétique.

Le premier point de ressemblance entre les modes de

propagation de la lumière et de l'induction électro-magnétique est que l'on peut démontrer mathématiquement, dans les deux cas, que les vibrations sont perpendiculaires à la direction de propagation.

On sait que les ondes lumineuses sont perpendiculaires à la direction du rayon.

Le professeur Clerk Maxwell a montré que les directions des ébranlements magnétiques et électriques sont aussi toutes deux perpendiculaires à la ligne de force (1).

La figure 371 montre comment le professeur Maxwell conçoit une ligne de force électrique.

La ligne verticale est la direction de la force, et les ébranlements magnétiques et électriques lui sont perpendiculaires.

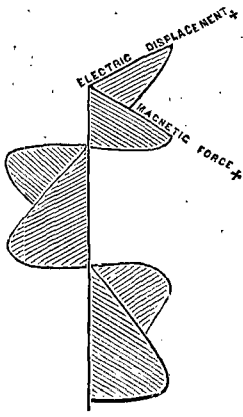


FIG. 371.

Un autre argument en faveur de cette théorie est qu'elle fournit une véritable raison mathématique de ce fait, que tous les corps réellement bons conducteurs sont extrêmement opaques. Ainsi, tous les métaux sont conducteurs et opaques. La conduction de l'électricité par des liquides transparents se fait autrement que par les métaux et ne contredit en rien cette déduction, conséquence mathématique néces-

saire de la théorie, à savoir que tous les conducteurs proprement dits doivent être opaques pour la lumière (2).

(1) Et aussi perpendiculaires entre elles.

(2) Il faut cependant reconnaître que l'or, l'argent et le platine, réduits en feuilles très minces, ne sont pas tout à fait aussi opaques que le voudrait la théorie.

Mais un témoignage bien plus important encore en faveur de l'unité et non de la dualité des éthers, résulte de la comparaison des vitesses avec lesquelles se propagent les ébranlements optiques et électro-magnétiques, dans différentes circonstances.

Si on peut démontrer que la vitesse de l'induction électro-magnétique est sensiblement la même que celle de la lumière non seulement dans l'air et dans le vide, mais aussi dans tous les corps transparents, nous aurons bien la certitude qu'il n'y a pas deux éthers, mais un seul ; en effet, il serait absurde de supposer que chaque portion de l'espace est remplie en totalité de deux éthers identiques sous le rapport des seules propriétés que nous pouvons examiner, mais distincts néanmoins et différents l'un de l'autre.

De plus, si les valeurs des vitesses sont à peu près, mais pas tout à fait les mêmes, nous devons réserver notre jugement : on nous permettra toutefois d'envisager comme possible l'existence d'un éther unique vibrant un peu différemment suivant qu'il est ébranlé par l'électricité ou la lumière.

COMPARAISON DES VITESSES DANS L'AIR ET DANS LE VIDE

La vitesse de la lumière a été mesurée expérimentalement de plusieurs manières.

Les expériences les plus récentes sont celles faites par le professeur Cornu (1) en 1874, qui a trouvé que dans le vide :

$$v = 3,004 \times 10^{10} \text{ centimètres par seconde.}$$

Voici les résultats d'observations plus anciennes :

(1) *Annales de l'Observatoire de Paris*, 1876. *Mémoires*, tome XIII.
GORDON. Électricité. II. — 39

Fizeau	$3,14 \times 10^{10}$
Observations astronomiques.....	3,08 —
Foucault.....	2,98 —
Moyenne.....	$3,06 \times 10^{10}$

Mais les expériences de M. Cornu sont si supérieures aux précédentes comme exactitude, que nous adopterons sa valeur, soit 3,004.

L'indice de réfraction de l'air est :

$$1,000294.$$

La vitesse de la lumière dans l'air est donc :

$$\frac{3,004 \times 10^{10}}{1,000294} = 3,0031 \times 10^{10}.$$

Or, la valeur moyenne des déterminations les plus récentes du rapport des unités électro-statiques et électro-magnétiques donne pour vitesse de l'induction électro-magnétique dans l'air :

$$v = 2,9857 \times 10^{10}.$$

On peut donc dire que, *dans l'air, les vitesses de la lumière et de l'induction électro-magnétique sont sensiblement égales.*

VITESSES DANS LES AUTRES MILIEUX

La vitesse de la lumière dans un milieu ayant pour indice de réfraction μ est égale à

$$\frac{\text{vitesse dans l'air}}{\mu}.$$

Le professeur Clerk Maxwell a démontré mathématique-

ment que la vitesse de l'induction électro-magnétique dans un milieu est égale à

$$\frac{\text{vitesse dans l'air}}{\sqrt{K}},$$

où K est la capacité inductive spécifique pour l'induction électro-statique, comme on l'a définie, vol. I, p. 109.

Or, si la vitesse de la lumière est égale à celle de l'induction électro-magnétique dans tous les corps isolants transparents, nous aurons :

$$\frac{\text{vitesse de la lumière dans l'air}}{\mu} = \frac{\text{vitesse de l'induction électro-magnétique dans l'air}}{\sqrt{K}}$$

Mais nous avons vu que les vitesses dans l'air sont égales; si donc les autres vitesses sont aussi égales, nous devons avoir :

$$\mu = \sqrt{K}.$$

Remarquons que le professeur Maxwell démontre que de toutes les valeurs de μ nous devons prendre celle qui correspond à des ondes d'une longueur infinie (1).

(1) On détermine l'indice de réfraction pour des ondes de longueur infinie de la façon suivante :

On a l'équation générale :

$$\mu = A + \frac{B}{\lambda^2}. \quad (1)$$

Pour déterminer A , il faut et il suffit que nous puissions déterminer les valeurs de μ pour deux rayons de longueurs d'onde λ et λ' différentes, car on a :

$$\begin{aligned} \mu\lambda^2 &= A\lambda^2 + B \\ \mu'\lambda'^2 &= A\lambda'^2 + B. \end{aligned}$$

En retranchant les équations l'une de l'autre, on élimine B et on trouve

$$A = \frac{\mu\lambda^2 - \mu'\lambda'^2}{\lambda^2 - \lambda'^2}; \quad (2)$$

EXPÉRIENCES DE GORDON

Le tableau suivant permet de comparer, pour différents diélectriques, les valeurs de μ avec celles de $\sqrt{\bar{K}}$ obtenues par l'auteur (voir vol. I, p. 191).

Diélectrique.	$\sqrt{\bar{K}}$.	$\mu_{\lambda=\infty}$.	μ_D .	μ_H .	$\lambda_{\mu} = \sqrt{\bar{K}}$.
Flint glass double très lourd.....	1,778	1,672	1,710	1,757	3,527, longueur d'onde pour N dans l'ultra-violet. 2,862
Flint très lourd....	1,747	1,620	1,650	1,688	
Flint léger.....	1,734	1,555	1,574	1,601	
Crown dur.....	1,763	1,504	1,517	1,533	
Paraffine.....	1,4119	1,4220(4)	1,9		
Soufre.....	1,606	...	2,4		
Sulfure de carbone.	1,345	...	1,611		
Verre ordinaire....	1,801	...	1,543		

La valeur de μ est donnée pour les raies H et D, et pour des radiations de longueur d'onde infinie. La dernière colonne montre pour quelle longueur d'onde l'indice de réfraction serait égal à la racine carrée de la capacité inductive spécifique.

EXPÉRIENCES DE MM. GIBSON ET BARCLAY

MM. Gibson et Barclay ont trouvé pour la paraffine (voir vol. I, p. 138)

$$\sqrt{\bar{K}} = 1,405$$

mais d'après (1), $\mu = A$ pour $\lambda = \infty$, d'où

$$\mu_{\lambda=\infty} = \frac{\mu\lambda^2 - \mu'\lambda'^2}{\lambda^2 - \lambda'^2}.$$

Phil. Trans., 1879, part. I, p. 441.

(2) Gladstone et Clerk Maxwell; Maxwell, *Electricity*, § 789, vol. II. p. 389. Le point de fusion de ma paraffine était à 68°C.; celle du Dr Gladstone fondait au-dessous de 57°C.

qui ne diffère pas beaucoup de la valeur de μ donnée au tableau précédent.

EXPÉRIENCES DE BOLTZMANN

On peut comparer \sqrt{K} et μ ou K et μ^2 .

C'est la seconde forme qui a été adoptée dans le tableau comparatif donné par le professeur Boltzmann. Le tableau suivant qui compare les valeurs de K et de μ^2 , se trouve dans le mémoire du professeur Boltzmann, cité vol. I, p. 139.

Diélectrique.	K		μ^2 .
	Par la méthode du condensateur.	Par la méthode d'action à distance.	
Soufre.....	3,84	3,90	4,06
Paraffine	2,32	2,30	2,33
Résine.....	2,55	2,34	2,38
		2,48	

SOUFRE CRISTALLISÉ.

Dans le mémoire cité, vol. I, p. 157, le professeur Boltzmann donne la comparaison suivante de K et de μ^2 suivant les 3 axes g, m, k , du soufre cristallisé.

Diélectrique.	K.	μ^2 .
Soufre.. ... { g	4,773	4,596
{ m	3,970	3,886
{ k	3,811	3,591

EXPÉRIENCES DE SCHILLER

Dans le mémoire cité, vol. I, p. 161, Schiller fait les comparaisons suivantes :

Diélectrique.	K		μ^2
	Par la méthode lente.	Par la méthode d'oscillation.	
Paraffine blanche, refroidie lentement.....	2,47	1,89	2,34
Id. refroidie vite, presque transparente.....	1,92	1,81	
Caoutchouc brun.....	2,34	2,12	2,19(1)
			2,25

EXPÉRIENCES DE SILOW

Dans le mémoire cité, vol. I, p. 162, Silow trouve pour la térébenthine :

$$\sqrt{K} = 1,490 \quad \mu_{\lambda=\infty} = 1,459.$$

COMPARAISON DE BOLTZMANN POUR LES GAZ.

Dans le mémoire cité, vol. I, p. 198, le professeur Boltzmann fait pour les gaz la comparaison suivante.

L'indice de réfraction et la capacité inductive spécifique du vide sont pris pour unités.

Diélectrique. Gaz à 0° C. et 760 millimètres.	\sqrt{K} .	μ .
Air.....	1,000295	1,000294
Acide carbonique.....	1,000473	1,000449
Hydrogène.....	1,000132	1,000138
Oxyde de carbone.....	1,000345	1,000340
Protoxyde d'azote.....	1,000497	1,000503
Gaz oléifiant.....	1,000656	1,000678
Gaz des marais.....	1,000472	1,000443

(1) Il y a quelque confusion dans le tableau des nombres donnés par Schiller pour la paraffine.

CONCLUSION GÉNÉRALE.

L'examen des tableaux précédents montre que dans certains cas les vitesses de la lumière et de l'induction électromagnétique sont à très peu près égales, mais que dans d'autres cas il y a de très grandes différences.

En somme, l'accord observé est assez complet pour nous donner bon espoir que, quelque jour, les discordances seront expliquées et éliminées; en attendant, l'accord complet des vitesses de la lumière et de l'induction électromagnétique dans l'air et dans les gaz, et les nombreuses relations directes qui existent entre la lumière et l'électricité ne nous laissent guère douter qu'il n'y ait entre ces agents un lien étroit, et que leurs effets ne soient que deux formes de cette énergie commune, de nature inconnue, qui se retrouve certainement sous tous les phénomènes physiques.

NOTE

SUR LA BIBLIOGRAPHIE DES TRAVAUX CONCERNANT LA CAPACITÉ
INDUCTIVE SPÉCIFIQUE

M. F. Rossetti, professeur à l'Université de Padoue, nous fait remarquer que dans l'exposé des travaux concernant la capacité inductive spécifique (chapitre XI, tome I, page 109, et Appendices I et II à la suite), on a complètement passé sous silence les recherches faites sur le même sujet par les physiciens italiens. Sous le titre : *Sul potere specifico induttivo dei coibenti* (1), M. Rossetti a publié en 1873 un mémoire divisé en deux parties (2).

Dans la première partie, l'auteur résume les travaux les plus importants dont la capacité inductive spécifique a été l'objet avant 1873, savoir :

- 1° Les expériences de Belli, 1830-37 (3);
- 2° Les expériences de Faraday, 20 décembre 1837 (4);
- 3° Les expériences de Snow Harris, 1842 (5);
- 4° La discussion entre Riess et Faraday, 1855 (6);
- 5° Les expériences de Matteucci, 1849 et 1859 (7);
- 6° Les expériences de W. Siemens, 1857 (8);
- 7° Les expériences de Gaugain, 1862 (9);
- 8° Enfin le remarquable travail de M. R. Felici, 1871 : *Sulle azioni*

(1) *Coibent* ou *cohibant* est synonyme d'*isolant*.

(2) *Atti del R. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti*. Venezia, 1873, vol. II, série IV, et *Nuovo Cimento*, 1873, série II, t. X, p. 170-227.

(3) Prof. Giuseppe Belli, *Corso elementare di Fisica sperimentale*. Milano, 1830-38, vol. III, p. 239, § 1038 et suivants.

(4) *Phil. Trans. of the R. Society of London*, 1838, et P. 1. *Experimental Researches*, eleventh series.

(5) *Phil. Trans. of the R. Society of London for 1842*, t. I, p. 165 : *On the specific inductive Capacities of certain electrical substances*.

(6) *Phil. Mag.*, II, 1, 1856 : *On the action of non-conducting bodies in electric induction*.

(7) *Sur les propriétés électriques des corps isolants*, *Ann. de Chim. et de Phys.*, vol. XXVII, 1849, p. 163-170 et vol. LVII, 1859, p. 423.

(8) *Ueber die elektrostatistische Induction und die Verzögerung der Stroms in Flaschendrähnen*, *Pogg. Ann.*, 1857, vol. XII, p. 66.

(9) *Sur les relations qui rattachent la théorie de la distribution statique de l'électricité à la théorie de la propagation* *Ann. de Chim. et de Phys.*, 1862, vol. 64, p. 174.

elletriche dei corpi non conduttori soggetti alla influenza d'un corpo elletrizzetto (1).

« Dans le *Physik. Wörterbuch von Gehler* (neu bearbeitet von Brandes, Gmelin, Horner, Muncke and Pfaff), 1827, vol. IV, 1 abthl. page 364, on lit, ajoute M. Rossetti, que déjà en 1758, Wilke s'était aperçu que la charge d'un condensateur à cire d'Espagne était plus grande que dans le cas d'un condensateur à soufre, à huile et à air. Mais il ne paraît pas qu'il ait pu faire aucune mesure, puisque Pfaff (le rédacteur de cet article du dictionnaire), à la page 372, déclare qu'il n'y avait pas d'expériences concluantes permettant de décider si la nature du diélectrique a ou n'a pas quelque influence sur la grandeur de la charge.

» Si l'on excepte donc les expériences de Cavendish, faites entre 1771 et 1781; mais publiées pour la première fois par J. Clerk Maxwell en 1879, ce serait Belli qui aurait le premier formulé et publié cette loi : *qu'à égalité de dimensions des armatures et à égalité d'épaisseur de l'isolant, la capacité varie avec la nature de l'isolant* (2), en l'appuyant sur des expériences et des mesures électrométriques très précises, faites par lui avant 1838, c'est-à-dire avant les expériences de Faraday. »

La seconde partie du mémoire de M. Rossetti est consacrée à ses recherches personnelles : l'auteur étudie l'influence que la nature des isolants exerce sur l'induction en prenant comme source d'électricité une machine de Holtz et comptant le nombre de tours nécessaire dans chaque cas pour produire 100 étincelles entre deux boules données, présentant entre elles un écartement fixe. M. Rossetti a trouvé ainsi pour le verre le nombre 3,45; des expériences de Felici il a déduit le nombre 3,35 : on observera que ces nombres diffèrent peu des valeurs obtenues par M. Gordon en 1877 et 1879, lesquelles varient de 3,013 à 3,838 (tome I, page 194). J. R.

(1) *Nuovo Cimento*, 1871, série II, t. V et VI, p. 5 et 73.

(2) *A pari dimensione delle armature e a pari grossezza delle astre coibenti, la capacita varia secondo la natura di queste lastre.*

ERRATA

Page 40, ligne 18, au lieu de $n = 1928,15$, lisez $n = 1028,15$.

Page 183, ligne 26, au lieu de figure 121, lisez figure 209, p. 131.

Page 428, la figure 336 doit être renversée.

TABLE DES PLANCHES

DU TOME SECOND

XXVI.	Oscillations de l'extra-courant.....	17
XXVII.	Électro-dynamomètre de l'Association Britannique.....	34
XXVIII.	Électro-aimant de Tyndall pour le diamagnétisme.....	63
XXIX.	} Lignes équipotentielles.....	81
XXX.		84
XXXI.		87
XXXII.	Bobine d'induction de 17 pouces (0 ^m ,43).....	99
XXXIII.	Interrupteur à grande vitesse.....	106
XXXIV.	Grande bobine de M. Spottiswoode.....	109
XXXV.	Tube à vide (colorié) en <i>chromolithographie</i>	134
XXXVI.	} Tubes à vide de Cassiott.....	139
XXXVII.		140
XXXVIII.	Pompes à air de M. de la Rue.....	160
XXXIX.	Appareils de M. de la Rue... ..	162
XL.	} Stries de M. de la Rue.....	165
XLI.		166
XLII.		176
XLIII.		168
XLIV.		169
XLV.	170	
XLVI.	Décharges dans l'hydrogène.....	188
XLVII.	Décharges dans un large tube... ..	190
XLVIII.	Matière radiante de Crookes.....	261
XLIX.	Machine rhéostatique de Planté.....	346
L.	Machine de l'Alliance.....	357
LI.	Machine auto-excitatrice de Wilde.....	380
LII.	Électricité de contact : Ayrton et Perry.....	456
LIII.	Rapport des unités : Thomson.....	504
LIV.	Rapport des unités : Maxwell.....	506
LV.	Constante de Verdet.....	546
LVI.	Répétition par Röntgen des expériences électro-optiques de Kerr en <i>chromolithographie</i>	575

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME SECOND (1)

TROISIÈME PARTIE

(Suite.)

ÉLECTRO-CINÉTIQUE

CHAPITRE XXIX

COURANTS D'INDUCTION PAR LA FERMETURE ET L'OUVERTURE DU CIRCUIT

Mouvement relatif.....	
Variation du courant.....	2
Accroissement graduel.....	2
Extra-courant.....	3
Mesure des courants produits par la fermeture et la rupture du circuit.....	4
Expériences de Blaserna.....	5
L'interrupteur différentiel.....	6
Vitesse de rotation.....	8
Expériences préliminaires.....	9
Courant induit de fermeture.....	10
Courant induit de rupture.....	13
Extra-courant de fermeture.....	15
Extra-courant de rupture.....	18
Loi de Lenz.....	18
Expériences de Schiller sur les oscillations électriques.....	19
Application à la capacité inductive spécifique.....	22
* Recherches de M. Mouton sur l'induction.....	23
* Note sur l'induction.....	25

CHAPITRE XXX

DES BOBINES ÉTALONS

Constantes d'un instrument.....	28
Galvanomètre étalon et galvanomètre sensible.....	28
Comparaison des bobines.....	29
Grand électro-dynamomètre de l'Association Britannique.....	31

(1) Les articles ajoutés dans l'édition française sont marqués d'un astérisque.

APPENDICE AU CHAPITRE XXX

— DÉTERMINATION DES CONSTANTES D'UNE HÉLICE.....	35
Détermination du nombre de tours.....	35
Différence de potentiel magnétique aux deux bouts.....	36
Formule d'intégration.....	36
Comparaison expérimentale d'une hélice et d'un dynamomètre.....	37
Vérification.....	40
Détermination de la somme des aires.....	41
Calcul de l'intensité du courant passant dans une hélice par la déviation de l'aimant suspendu.....	42
* II. — BOBINE BIFILAIRE DE WEBER.....	42
Mesure électro-magnétique de l'intensité horizontale de la terre.....	44
Action d'une bobine fixe sur un bifilaire.....	45
Vérification expérimentale du principe d'Ampère.....	46
Théorie de l'électro-dynamomètre de Weber.....	46
Application à la mesure des courants alternatifs.....	47
Mesure de la durée des courants instantanés.....	47
Description de l'électro-dynamomètre de Weber.....	48
Autres formes d'électro-dynamomètres.....	50

CHAPITRE XXXI

ÉLECTRO-AIMANTS. — DIAMAGNÉTISME ET ACTION DU MAGNÉTISME SUR LES CRISTAUX

Grand électro-aimant.....	51
Balance de torsion pour les électro-aimants.....	54
Lignes axiale et équatoriale.....	54
Diamagnétiques et paramagnétiques.....	54
Découverte du diamagnétisme par Faraday.....	55
Listes des corps diamagnétiques.....	56
Métaux diamagnétiques et paramagnétiques.....	57
Comparaison des intensités magnétiques du fer et du bismuth.....	58
Polarité diamagnétique.....	59
Expériences de Faraday.....	59
Expériences de Verdet.....	60
Premières expériences de Tyndall.....	62
Discussion mathématique de Weber.....	64
Expériences de Weber.....	65
Secondes expériences de Tyndall.....	65
Polarité des diamagnétiques liquides.....	72
Action du magnétisme sur les cristaux.....	73
Effets de la compression.....	74
Cristaux artificiels.....	75
Effets du milieu environnant.....	76

CHAPITRE XXXII

EXPÉRIENCES DU PROFESSEUR ADAMS SUR LA DÉTERMINATION DES LIGNES
ET SURFACES ÉQUIPOTENTIELLES ET DES LIGNES DE FLUX

Méthode d'observation.....	78
Tracé des lignes équipotentielles sur une feuille d'étain.....	79
1 ^{er} cas : feuille carrée, 2 électrodes.....	80
2 ^o — — circulaire, 2 électrodes.....	82
3 ^o — grande feuille carrée, 5 électrodes.....	83
4 ^o — demi-quadrant du troisième cas.....	85
5 ^o — feuille indéfinie, 3 électrodes.....	86
6 ^o — disque circulaire, 2 électrodes.....	89
Tracé des courbes dans l'espace à trois dimensions.....	90
7 ^o cas : liquides, 2 électrodes.....	92
Électrodes linéaires.....	93
10 ^o cas : sulfate de zinc, 2 électrodes linéaires.....	93
11 ^o — — — 3 —.....	93
Lignes de flux.....	94

CHAPITRE XXXIII

LA BOBINE D'INDUCTION

Théorie de la bobine d'induction.....	96
Construction.....	97
Description d'une bobine de 17 pouces (0 ^m ,43).....	98
Nécessité d'une interruption brusque.....	98
Condensateur.....	100
Interrupteurs.....	100
— à lame vibrante.....	100
— à mouvement d'horlogerie et à main.....	102
— à roue de Spottiswoode.....	104
— rapide de Spottiswoode.....	105
— à grande vitesse de Gordon.....	107
Bobine de Spottiswoode ..	108
Construction.....	108
Longueur des étincelles.....	111
* Bobine de Ruhmkorff.....	111
* Bobine de Siemens.....	113
* Bobine de l'Institut polytechnique.....	113

CHAPITRE XXXIV

DE LA DÉCHARGE DE LA BOBINE D'INDUCTION ET DE LA DÉCHARGE
EN GÉNÉRAL

Décharges dans l'air entre une pointe et un disque.....	114
Décharge en aigrette.....	115
Étincelle courte et flammes.....	115
Commutations.....	115

Décharge sur un miroir.....	116
Perforation de plaques de verre.....	116
Décharge avec l'interrupteur rapide.....	116
Condensateur secondaire.....	117
Bobine d'induction et machine de Méritens.....	119
Décharge dans l'air raréfié.....	119
Expériences de Gordon. — Appareils.....	121
Expériences.....	123
Résultats.....	125
Table des résultats.....	126
Détermination de la force électro-motrice nécessaire pour produire l'étincelle.....	128
Expériences de Sir W. Thomson.....	128
Comparaison des résultats de Thomson et de Gordon.....	129
Expériences de De la Rue et Müller.....	130
Décharges dans les différents gaz.....	132
Tubes à vide (ou de Geissler).....	133
Fluorescence.....	133
Effet des aimants sur la décharge dans l'air raréfié.....	134

CHAPITRE XXXV

STRIES

Stries dans les tubes étroits.....	135
* Observations de M. Abria.....	135
Expériences de Gassiott.....	136
Emploi d'une pile au lieu d'une bobine d'induction.....	136
Vides d'acide carbonique.....	136
Effet des condensateurs.....	137
Intermittence de la décharge.....	139
Effet de la résistance.....	139
Conclusion de Gassiott.....	139
Expériences de De la Rue, Müller et Spottiswoode.....	139
Emploi de la pile au chlorure d'argent.....	141
Emploi de condensateurs.....	141
Les stratifications accompagnent les pulsations du courant.....	141
Preuve expérimentale.....	141
Expériences de Spottiswoode.....	143
Emploi de l'interrupteur rapide.....	143
Sensibilité de cet appareil.....	144
Décharges complémentaires de fermeture et de rupture.....	144
Flux de stries.....	145
Moyen de le régler par des résistances.....	146
Miroir tournant.....	148
Phénomènes observés.....	150
Flux de stries dans un tube conique.....	153
Conclusions.....	153

TABLE DES MATIÈRES.

623

Expériences de De la Rue et Müller.....	157
La décharge est toujours disruptive.....	157
La décharge n'obéit pas aux lois de Ohm.....	158
Expériences de Hittorff et Schultz.....	158
Manière de faire le vide.....	158
* Emploi de substances absorbantes.....	161
Disposition générale de l'appareil.....	161
Définition de $M = 1$ millionième d'atmosphère.....	163
Entités lumineuses.....	170
Résumé des expériences.....	170

* APPENDICE AUX CHAPITRES XXXIV ET XXXV

EXPÉRIENCES SUR LA DÉCHARGE DISRUPTIVE AVEC LA PILE A CHLORURE
D'ARGENT, PAR DE LA RUE ET MÜLLER

Première partie.....	175
Distances explosives aux pressions ordinaires.....	175
Effet des condensateurs.....	176
Commotions.....	177
Deuxième partie.....	177
Mesure de la résistance des tubes.....	177
Pont de Wheatstone.....	178
Potentiel le long du tube.....	178
Lois du passage du courant à travers les gaz raréfiés.....	179
Vérification des résultats de Varley.....	179
Troisième partie.....	180
Différence de potentiel dans un tube à décharge.....	180
Potentiel nécessaire pour la décharge entre deux disques à dis- tance constante et sous des pressions variables.....	182
Distance explosive à pression constante dans l'air.....	185
Étude de l'arc de décharge.....	185
Expansion du gaz.....	185
Apparence de l'arc.....	187
Décharges dans un large tube.....	189
Conclusions.....	191
Mesure de la différence de potentiel des électrodes d'un tube.....	192
— avec le galvanomètre.....	192
— avec l'électromètre.....	194

CHAPITRE XXXVI.

DE L'ÉTAT SENSITIF DES DÉCHARGES A TRAVERS LES GAZ RARÉFIÉS

Expériences de Spottiswoode et Moulton.....	196
Définition et description de l'état sensitif.....	196
L'état sensitif est dû à des intermittences périodiques.....	198
n'y a pas de sensibilité sans intermittences.....	201
L'effet de l'approche d'un conducteur est dû à la détente de la tension électrique.....	203

Nouvelle distribution à chaque pulsation.....	204
L'effet est dû à l'induction électro-statique.....	206
* Preuve de cette proposition.....	206
L'effet de détente est indépendant du potentiel du conducteur qui le produit.....	206
* Preuve de cette proposition.....	206
Effets de répulsion et de décharge.....	207
* Leur définition.....	207
Effet spécial ou de non-détente.....	209
Différence des effets de détente et de non-détente.....	211
Examen de l'effet de non-détente.....	211
Division de la décharge en segments.....	213
* De l'effet de détente, et de l'effet spécial quand l'étincelle d'air est négative.....	214
Nature des stries et leur production artificielle.....	217
<i>Modus operandi</i> d'une décharge ordinaire stratifiée.....	220
Unité de décharge stratifiée.....	221
* Définition de l'espace blanc.....	222
Structure physique des stries.....	223
Durée de la décharge.....	224
Tous les effets peuvent être produits par la décharge d'une bouteille de Leyde.....	224
Tous les effets de détente et de non-détente se produisent en entier dans chaque pulsation.....	225
La décharge consiste dans le passage d'électricité libre.....	225
Des décharges unipolaires.....	226
Manière de les produire.....	227
Décharge pénétrant dans le tube et revenant par le même chemin.....	228
La décharge unipolaire est sensitive et peut être ramenée en arrière.....	228
Tube avec une électrode intermédiaire.....	229
Répulsion mutuelle de deux colonnes unipolaires.....	230
La décharge ne dépend que de l'électrode où se trouve l'étincelle d'air.....	231
Conclusion générale.....	232
Indépendance des décharges de chaque électrode.....	232
État du tube pendant la décharge.....	233
Remarques finales.....	233
Toutes les décharges ont les mêmes éléments essentiels.....	233
Toutes les décharges sont discontinues.....	234

CHAPITRE XXXVII

PHÉNOMÈNES DANS LES VIDES EXTRÊMES. — EXPÉRIENCES DE CROOKES

Matière radiante.....	236
Tubes raréfiés à 1 M.....	237
Moyenne de libre parcours des molécules.....	237

TABLE DES MATIÈRES.

625

L'espace obscur au pôle négatif.....	238
Phosphorescence exercée par la matière radiante sur les objets qu'elle frappe.....	239
Phosphorescence du verre.....	239
— de divers minéraux, de l'émeraude et du diamant.....	240
Phosphorescence des rubis.....	241
La phosphorescence dépend du degré du vide.....	243
La matière radiante s'élançe en ligne droite du pôle négatif.....	244
La position du pôle positif n'a pas d'importance.....	245
La matière radiante interceptée par un corps solide projette une ombre.	248
La matière radiante exerce une action mécanique énérgique.....	251
Radiomètre électrique.....	252
La matière radiante est déviée par un aimant.....	254
Sa trajectoire est semblable à celle des projectiles.....	255
Différence de la déviation magnétique de la décharge avec le degré du vide.....	256
Expériences de cours sur la déviation magnétique et l'action mécanique.....	257
Les décharges ne se comportent pas comme des courants, mais comme de simples molécules électrisées.....	259
La matière radiante produit de la chaleur quand on arrête son mouvement.....	260
Fusion du verre.....	260
— du platine iridium.....	262

* APPENDICE AUX CHAPITRES XXXVI ET XXXVII

DE L'ÉTAT SENSITIF DES DÉCHARGES DANS LE VIDE (2^e PARTIE)

Suite des recherches de MM. Spottiswoode et Moulton.....	264
Introduction.....	264
Effet des actions inductives intermittentes sur les décharges continues dans le vide.....	266
Effet de la décharge intermittente d'une machine de Holtz sur la décharge continue d'une autre machine à travers un tube.	266
Étude des effets de sensibilité avec deux tubes auxiliaires placés de chaque côté du tube principal.....	267
Méthode du tube étalon pour l'examen des décharges intermittentes dans le vide.....	268
De l'effet de bouteille de Leyde des tubes à vide.....	269
la phosphorescence dans les tubes à vide.....	271
Description du phénomène.....	271
Comparaison avec le vent électrique.....	271
— avec le dépôt sur le verre près de l'électrode négative.	272
Production de la phosphorescence dans les vides modérés à l'aide d'une longue étincelle d'air.....	273
Emploi de la méthode de Ward.....	273

Expériences avec des tubes à différentes pressions.....	274
Influence des dimensions de l'électrode négative.....	274
Expériences en faisant varier la pression et la distance de la source qui produit la phosphorescence.....	275
Phosphorescence due à la concentration des courants par un aimant.....	276
Effet des courants moléculaires sur des pellicules de verre.....	276
Ralentissement des courants par la pression du gaz.....	276
Importance des courants moléculaires dans les recherches.....	277
De la décharge sensitive dans les vides extrêmes.....	277
Sensibilité de la phosphorescence.....	278
Relations entre la sensibilité et l'intermittence.....	278
Extension des résultats obtenus dans les vides modérés.....	278
La phosphorescence existe dans les décharges sensitives comme dans les décharges continues.....	279
Observations avec le miroir tournant.....	279
Expérience avec le radiomètre.....	279
La phosphorescence doit être étudiée séparément de la décharge proprement dite.....	280
Des effets de détente positive dans les tubes très raréfiés.....	280
I. Phosphorescence de détente.....	280
Description du phénomène.....	280
Le siège de son action est à la surface limite de l'électrode et du gaz.....	281
Divers modes de production du phénomène.....	281
La direction et l'origine des courants de détente sont données par les ombres.....	282
La direction n'est pas strictement normale à la surface de détente.....	282
Forme de la figure de phosphorescence due à une bande longitudinale.....	282
Une bande transversale ou un anneau.....	283
Une hélice.....	283
Interférence des courants moléculaires.....	284
II. Ombres virtuelles.....	285
Définition.....	285
Elles résultent d'interférences de courants moléculaires..	286
Expériences diverses.....	286
Elles émanent d'électrodes négatives et ne sont point dirigées vers des électrodes positives.....	287
III. La lumière positive et la phosphorescence qui l'accompagne.	288
Sensibilité de la luminosité filiforme.....	288
Phosphorescence annexe.....	288
Elle est due à l'action locale des parois du tube.....	289
Effet d'un aimant sur sa forme.....	289
Moyen de la séparer de la luminosité positive.....	290

TABLE DES MATIÈRES.

627

De l'effet positif spécial dans les tubes très raréfiés.....	290
De l'effet de détente et de l'effet spécial négatifs dans les tubes très raréfiés.....	291
Conclusions générales relatives à la décharge électrique.....	291
I. Grandeur relative de durée des phénomènes de la décharge.	291
Énumération des petites quantités de temps.....	292
Leur grandeur comparative.....	292
Émission des courants moléculaires.....	293
Luminosité positive et espace blanc.....	294
Énumération des quantités de temps par ordre de grandeur décroissante.....	296
II. Différence de durée des décharges positive et négative.....	297
III. De la colonne positive.....	298
IV. Des courants moléculaires.....	299
Comparaison avec la décharge de noir de fumée déposé sur l'électrode négative.....	300
Ni le tube-étalon ni le téléphone ne révèlent d'action électrique spéciale dans les parties phosphorescentes.....	300
La décharge proprement dite semble indépendante, en vitesse et en direction, des courants moléculaires.....	300
Les courants moléculaires paraissent connexes de la décharge, au moment de l'émission seulement.....	300

CHAPITRE XXXVIII

ÉLECTROLYSE

Description du phénomène.....	302
Nomenclature de Faraday.....	302
Lois de l'électrolyse.....	303
Théorie de Clausius.....	304
Équivalence électro-chimique.....	307
Le voltamètre.....	308
Polarisation électrolytique.....	309
Expériences de Ayrton et Perry.....	309
Mesures des déviations.....	309
Conduite de l'expérience.....	311
Ressemblance des courbes de déformation pour la bouteille de Leyde, le voltamètre et la flexion d'une tige.....	312

* APPENDICE AU CHAPITRE XXXVIII

Équivalents électro-chimiques.....	314
Mesure de la quantité et de l'intensité par les voltamètres.....	314
Comparaison des voltamètres et des galvanomètres.....	315
Conduction électrolytique.....	316
Produits secondaires de l'électrolyse.....	316
Polarisation des électrodes.....	317
Mesure de la force de polarisation.....	319

Procédés de Wheatstone et Ed. Becquerel	319
Procédé de Lippmann	319
Comparaison de la pile secondaire avec la bouteille de Leyde	320
Expériences de Warren de la Rue et Müller	321
Suppression ou atténuation de la polarisation dans les piles	325
Zinc amalgamé	327
Rhétome liquide	327
Électro-motographie d'Edison	328
Résistance électrique des électrolytes	329
Méthode de Paalzow	329
— de Kohlrausch et Nippoldt	329
— de Lippmann	330
Résistance électrique des gaz raréfiés	330
Résultats de Varley	330
Expériences de de la Rue et Müller	331
Conservation de l'énergie dans l'électrolyse	332
Chaleur dégagée dans les actions chimiques	332
Chaleur dégagée dans le circuit	333
Signification mécanique de la force électro-motrice	333
Nécessité de la polarisation des électrodes	333
— des phénomènes d'induction	334
Application au calcul des forces électro-motrices	335

CHAPITRE XXXIX

BATTERIES SECONDAIRES. — MACHINES RHÉOSTATIQUES

Piles secondaires	336
Recherches de Planté sur les piles secondaires	336
« Formation » des lames	338
Accouplement en série ou en surface	340
Effets calorifiques	340
Effets magnétiques	341
Durée des courants secondaires	341
Constance du courant	341
Conservation de la charge	342
Force électro-motrice	342
* Résistance et rendement	342
Transformation du courant d'une pile voltaïque au moyen d'une pile secondaire	342
Décharge dans les tubes à vide	345
Machine rhéostatique de Planté	345
Machine de « quantité »	347
Décharge de la machine de quantité	349
Effets calorifiques	349
Effets mécaniques	350
Nœuds de vibration formés dans un fil métallique	350
Bruit dans le fil	351

TABLE DES MATIÈRES.

629

Fragilité du fil.....	351
Conclusion de Planté.....	351

CHAPITRE XL

MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES ET MACHINES ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

* Principe et définitions.....	352
Machines magnéto-électriques.....	353
* Machines de Pixii, Saxton et Clarke.....	353
* Commutateur.....	354
* Machines de l'Alliance et de Holmes.....	356
* Armature de Siemens.....	358
* Machine de Gramme.....	360
— à aimant Jamin.....	363
Machine de Méritens.....	364
Machines dynamo-électriques.....	366
* Machine de Wilde.....	366
* Principe des machines dynamo.....	368
* Machines dynamo à courant continu.....	370
Machine Gramme.....	370
* Machine Siemens.....	371
* Machine Brush.....	373
* Machine Farmer-Wallace.....	374
* Machines Lontin, Weston, Maxim.....	375
* Machines dynamo à courants alternatifs.....	375
* Machine Lontin.....	376
* Machine Gramme.....	376
* Machine Siemens.....	377
* Machine auto-excitatrice de Wilde.....	379
Machines électro-magnétiques ou moteurs électriques.....	379
Moteur de Apps.....	381
Reversibilité de machines de Gramme.....	382
* Moteur Deprez.....	382
Transmission électrique de la force.....	383
* Applications.....	384
* Labourage électrique.....	384
* Chemin de fer électrique.....	384
* Poste aux lettres électrique.....	384
* Synchronisme de deux mouvements de rotation.....	384

* APPENDICE AU CHAPITRE XL

Induction dans les plaques conductrices.....	386
Roue de Barlow.....	387
Disque de Faraday.....	387
Recherches de Matteucci.....	387
Retard des courants induits.....	388
Disque de Foucault.....	388

<i>Théorie de la machine de Gramme de M. A. Bréguet</i>	388
<i>Rotations électro-magnétiques</i>	389
Premier système.....	390
Deuxième système.....	393
Modes d'enroulement du fil.....	395
Écrans magnétiques.....	396
Troisième système ou circuit Gramme.....	397
<i>Machines dérivant de cette théorie</i>	399
Position dissymétrique des frotteurs.....	400
<i>Recherches de MM. Mascart et Angot</i>	400
<i>Rendement des moteurs électriques</i>	401
<i>Appareils pour la mesure de l'énergie</i>	402
<i>Mesureur d'énergie de M. Deprez</i>	402
<i>Mesure des forts courants</i>	403
<i>Galvanomètre des cosinus</i>	403
<i>Mesureur à poids de M. Deprez</i>	403
<i>Galvanomètre de torsion de Siemens</i>	403
<i>Electro-dynamomètre de torsion de Siemens</i>	404
<i>Recherches de M. Joubert</i>	404
<i>Application des machines dynamo à la télégraphie</i>	407

CHAPITRE XLI

LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE

* <i>Éclairage par l'arc voltaïque</i>	408
* <i>Régulateurs électriques</i>	410
* <i>Régulateur Foucault-Dubosc</i>	410
* <i>Régulateur Serrin-Suisse</i>	412
* <i>Régulateurs à division</i>	413
* <i>Régulateurs Lontin et de Mersanne</i>	415
* <i>Lampe différentielle de Siemens</i>	415
* <i>Autres régulateurs</i>	416
<i>Bougies électriques</i>	418
<i>Bougie Jablochhoff</i>	418
* <i>Bougie Wilde</i>	421
* <i>Bougie Jamin</i>	423
* <i>Éclairage par l'incandescence</i>	425
* <i>Lampe Edison</i>	426
* <i>Lampe Lodiguyne</i>	426
* <i>Lampe Swan</i>	427
* <i>Lampe Reynier</i>	427
* <i>Lampe Werdermann</i>	430
* <i>Notes</i>	432
<i>Charbons à lumière</i>	432
<i>Unité de lumière</i>	432
<i>Résultats pratiques</i>	432
<i>Éclairage des villes</i>	433

TABLE DES MATIÈRES.

631

Éclairage des salles.....	434
Division de la lumière.....	434
Expériences de M. Joubert.....	434
Chaleur de l'arc voltaïque.....	435
Horticulture électrique.....	436

CHAPITRE XLII

RELATIONS ENTRE L'ÉLECTRICITÉ ET LA CHALEUR

Effet calorifique du courant électrique.....	437
Thermo-électricité.....	437
Échelle thermo-électrique.....	439
Pile thermo-électrique.....	439
Inversion du courant.....	440
Point neutre.....	441
Force électro-motrice (formule de Tait).....	441
Phénomène de Peltier.....	442
Détermination de l'effet de Peltier.....	443
Pyro-électricité.....	444
* Notes.....	445
Pouvoirs thermo-électriques.....	445
Tables des pouvoirs thermo-électriques.....	446
Applications.....	447
Point neutre.....	448
Chaîne thermo-électrique.....	448
Piles thermo-électriques.....	449
Pile de Clamond.....	449
Pile de Noé.....	451

CHAPITRE XLIII

ÉLECTRICITÉ DE CONTACT

Définition.....	453
Le contact produit une différence de potentiel, mais ne peut pas produire un courant.....	454
Théorie du contact de l'élément voltaïque : Volta, Thomson, Maxwell.....	455
Production du courant en fournissant de l'énergie mécanique aux métaux en contact. — Thomson.....	45
Id. Müller et Warren de la Rue.....	458
Électricité de contact dans les corps isolants. — Joseph Thomson.....	459
Expériences de Ayrton et Perry.....	460
Énoncé de la loi.....	461
Explication de la méthode d'induction.....	462
Description de l'appareil.....	463
Trou, rainure et plan.....	465
Expériences prouvant que le cuivre et le zinc dans l'eau ne sont pas au même potentiel.....	467

Quand le cuivre et le zinc sont dans l'eau, il y a trois états successifs.....	469
La somme des différences de potentiel de contact des matières qui composent l'élément est égale à la différence de potentiel de ses pôles.....	470
Tables des différences de potentiel au contact : solides avec solides.	473
Solides avec liquides, et liquides avec liquides	474
Résultats	476
* Force électro-motrice des éléments Daniell et Grove.....	476
* Électro-moteurs capillaires.....	477
* Expériences de Lippmann.....	477
* Appareil de Debrun.....	478
* Relations entre les phénomènes capillaires et électriques.	478

CHAPITRE XLIV

DIMENSIONS DES UNITÉS

Dimensions	479
Unités dérivées. — Vitesse.....	479
Notation de Maxwell.....	480
Unité de force	480
Rapport des unités	483
Les deux séries d'unités électriques	483
Unité électro-statique de quantité.....	484
Unité électro-statique de courant.....	484
Unité électro-magnétique de courant.....	485
Intensité de champ magnétique.....	485
Unité de courant.....	486
Unité électro-magnétique de quantité.....	486
Rapport des deux unités de quantité.....	486
Unité électro-statique de potentiel.....	487
Unité électro-statique de capacité.....	487
Unité électro-statique de résistance.....	488
Unité électro-magnétique de force électro-motrice et de potentiel.....	488
Unité électro-magnétique de capacité.....	489
Unité électro-magnétique de résistance.....	489
Résumé et rapport des dimensions dans les systèmes électro-statique et électro-magnétique	490
Rapport des deux séries d'unités électriques de quantité.....	490
Le rapport est une vitesse.....	491
Rapports des autres unités.....	492

CHAPITRE XLV

COMPARAISON EXPÉRIMENTALE DES UNITÉS ÉLECTRO-STATIQUES
ET ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

Le rapport est la vitesse de l'induction électro-magnétique.....	493
Preuve physique que le rapport est une vitesse	494

TABLE DES MATIÈRES.

633

Théorie des expériences.....	496
Méthodes expérimentales.....	497
Expériences de Weber et de Kohlrausch.....	497
Une même quantité d'électricité mesurée avec les deux unités.....	497
Sources d'erreur.....	498
Expériences de Sir W. Thomson.....	498
Une même force électro-motrice mesurée avec les deux unités.....	498
Expériences de Mc Kichan.....	500
Comparaison directe de Maxwell.....	500
Comparaison des actions électro-statique et électro-magnétique d'une même force électro-motrice.....	501
Expériences d'Ayrton et Perry.....	503
Une même capacité mesurée avec les deux unités.....	503
Expériences de Hockin.....	507
Nature physique de v	508
Expériences de Rowland sur l'effet magnétique d'une charge statique animée d'un mouvement rapide.....	508
Calcul du rapport des unités, déduit des expériences de Rowland.....	510
Résumé.....	510

QUATRIÈME PARTIE

ELECTRO-OPTIQUE

CHAPITRE XLVI

ROTATION MAGNÉTIQUE DE LA LUMIÈRE POLARISÉE

Préliminaires.....	511
Rotation naturelle.....	513
Découverte de la rotation magnétique par Faraday.....	513
Différence entre la rotation magnétique et la rotation naturelle.....	514
Mémoire de Faraday.....	515
Titre du mémoire.....	515
Action des aimants sur la lumière.....	516
Disposition des expériences.....	517
Première observation de la réapparition de la lumière.....	518
Sens de la rotation.....	519
Dans les diamagnétiques, la rotation a le même sens que le courant magnétisant.....	522
Liquides.....	524
Gaz.....	524
Corps ayant un pouvoir rotatoire naturel.....	524

Action des courants électriques sur la lumière.....	525
Loi du phénomène.....	525
Conclusions générales.....	525
Recherches ultérieures.....	530
Expériences de Verdet.....	530
Appareil: électro-aimant.....	531
Mesure de l'intensité du champ magnétique.....	532
Relation entre la rotation et la force magnétique.....	534
Effet de l'épaisseur du milieu.....	536
Effet de l'angle des directions de la lumière et de la force magnétique.....	537
Loi générale.....	538
Résumé de Maxwell.....	539
Expériences de Verdet sur la rotation dans divers milieux.....	540
Mélange de deux solutions.....	540
Pouvoirs rotatoires magnétiques.....	542
Effet de la couleur de la lumière.....	543
Détermination par Gordon de la constante de Verdet.....	544
Constantes de l'hélice.....	545
La lumière.....	545
Prisme de Jellett et son cercle.....	547
Force magnétique horizontale de la terre.....	549
Formule.....	549
Résultat.....	550
Expériences de Henri Becquerel.....	552
Effet du magnétisme terrestre sur la lumière.....	552
Pouvoirs rotatoires magnétiques.....	552
Table de ces pouvoirs.....	553
Relation entre l'indice de réfraction et le pouvoir rotatoire.....	553
Rotation des différentes radiations.....	554
Formule pour la rotation d'une radiation par le sulfure de carbone.....	556
Expériences de Kündt et Röntgen.....	556
Rotation dans une vapeur.....	556
Rotation dans les gaz.....	557
Expériences de H. Becquerel.....	557
Résultats.....	558
Expériences de Kündt et Röntgen.....	560
Résultats des premières recherches.....	561
Résultats des secondes recherches.....	562
Rotation dans l'air produite par le magnétisme terrestre.....	563
Kündt et Röntgen.....	563
H. Becquerel.....	563
* Double réfraction circulaire des corps soumis à l'action du magné- tisme.....	564
Théorie de la rotation magnétique de Maxwell.....	565
Résultats de la théorie.....	569

CHAPITRE XLVII

DÉCOUVERTES DU D^r KERR. — RELATION ENTRE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE
ET LA LUMIÈRE POLARISÉE

Le verre soumis à une déformation électro-statique devient biréfringent.	570
Disposition de l'expérience.....	570
Divers liquides agissent de même.....	571
Expériences de cours.....	571
Résumé des expériences du D ^r Kerr sur les liquides.....	572
Répétition par le professeur Röntgen des expériences du D ^r Kerr sur le sulfure de carbone.....	574
Effet du compensateur en verre déformé.....	576
Autres diélectriques.....	578
Liquides demi-conducteurs.....	578
Tube à vide.....	578
Liquides en mouvement.....	579
Diélectriques divers.....	579
Loi électro-optique du D ^r Kerr.....	579
Instruments. — La cellule.....	580
Effets chromatiques.....	581
Suite des instruments. — Électromètre.....	583
Compensateur de Jamin.....	584
Disposition de l'appareil ..	585
Calcul.....	585
Établissement de la loi et résumé des résultats.....	586

CHAPITRE XLVIII

DÉCOUVERTES DU D^r KERR (SUITE)

Rotation du plan de polarisation de la lumière réfléchie sur le pôle et le côté d'un aimant.....	588
Lumière réfléchie sur le pôle.....	588
Disposition des expériences.....	588
Sous-aimant.....	589
Incidence normale.....	589
Répétition des expériences par Gordon.....	590
Lumière réfléchie sur le côté d'un aimant.....	591
Disposition des expériences.....	591
Résumé des résultats.....	593

CHAPITRE XLIX

SÉLÉNIUM

* Propriétés du sélénium.....	594
* Découverte de Willoughby Smith et May.....	594
Expériences d'Adams et Day.....	595
La résistance varie comme la racine carrée de la lumière.	595
Plan des recherches.....	595

Préparation du sélénium.....	595
Le courant produit un <i>arrangement</i> permanent.....	596
La lumière produit sur le sélénium une force électro-motrice...	597
Résumé des résultats.....	598
* Photophone de Bell.....	599
Rayon vibratoire.....	600
Transmission de la parole par la lumière.....	601
Récepteurs de sélénium.....	602
Grille et spirale de Siemens.....	602
Récepteur plan.....	602
Récepteur cylindrique.....	603
* Radiophonie.....	603
Expériences de Bell.....	603
Expériences de Mercadier.....	604

CHAPITRE L

THÉORIE ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE LA LUMIÈRE DE CLERK MAXWELL

L'éther.....	607
Théorie de Maxwell.....	607
Les ondes lumineuses et l'induction électro-magnétique sont toutes deux normales au rayon.....	608
Les conducteurs sont opaques à la lumière.....	608
Comparaison de la vitesse de la lumière et de celle de l'induction électro-magnétique dans l'air et dans le vide.....	609
Vitesse dans les autres milieux.....	610
Expériences de Gordon.....	611
Indices de réfraction des radiations de longueur d'onde infinie.....	611
Expériences de Gibson et Barclay.....	612
Expériences de Boltzmann.....	613
Soufre cristallisé.....	613
Expériences de Schiller.....	613
Expériences de Silow.....	614
Comparaison de Boltzmann pour les gaz.....	614
Conclusion générale.....	615
* Note sur la bibliographie des travaux concernant la capacité inductive spécifique.....	616
Table des planches du tome II.....	618
Table des matières du tome II.....	619
Table alphabétique.....	637

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES

TABLE ALPHABÉTIQUE

DES DEUX VOLUMES

A

- Abria*: Stries, II, 135.
Accélération (unité d') : I, 80.
Accumulateurs : I, 262.
Accouplement des piles : I, 559.
Adams: Détermination expérimentale des lignes et surfaces équipotentielles et des lignes de flux, II, 78.
Adams et Day: Effet de la lumière sur le sélénium, II, 595.
Ader: Signal d'avertissement pour téléphones, I, 596.
Aimant : — brisé, I, 279, 284; — de Galilée, I, 347; — directeur, I, 494; — équivalent, I, 580; — Jamin, I, 289, 323; II, 363; — limite, I, 321.
Aimants : (action des courants sur les), I, 467; — (action des) sur la lumière, II, 516; — circulaires et elliptiques, I, 326; — (constitution des), I, 316; — (construction des), I, 323; — de Gauss, I, 306; — (équivalence des) et des courants, I, 585; — et solénoïdes, I, 587.
Aimantation : — (effet de la température sur l'), I, 342; — (effets moléculaires déterminés par l'), I, 345; — induite (coefficient d'), I, 335; — (influence des actions moléculaires sur l'), I, 344; — (intensité d'), I, 288; — (limite d'), I, 337; — (méthodes d') : simple touche, I, 275; double touche, I, 276; touche séparée, I, 276; procédé d'Élias, I, 314; — par induction, I, 286, 333; — permanente, I, 293, 334; — temporaire, I, 334; — s superposés, I, 330; — (unité d'intensité d'), I, 292.
Alliance (machine de l') : II, 356.
Ampère (loi d') : I, 581; — (vérification du principe d'), II, 46.
Angle solide, I, 297.
Angot: voir *Mascart*.
Anneau tournant : I, 625, 647.
Anion : II, 303.
Anode : II, 302.
Applications numériques sur l'électrostatique : I, 268.
Arc voltaïque : — (chaleur de l'), II, 435; — (éclairage par l'), I, 408; — (force de polarisation de l'), II, 434; — (résistance de l'), II, 433.
Armature de Siemens : II, 358; — s des aimants, I, 287, 319; — des faisceaux aimantés, I, 321.
Association Britannique (rapport du comité de l') : I, 626.
Astatique (galvanomètre) : voir *galvanomètre*; — s (aiguilles), I, 488.
Attraction des corps légers : I, 4, 10.
Attractions et répulsions : électriques, I, 26; — magnétiques, I, 303.

- Aurore boréale : I, 415; II, 189.
 Axiale (*ligne*) : II, 54.
Ayrton et Perry: analogie entre la charge résiduelle et la déformation des tiges, I, 106; — capacité inductive spécifique des gaz, I, 207; — détermination du rapport v des unités, II, 503; — électricité de contact, II, 460, 473, 474; — galvanomètre balistique, I, 497; — polarisation électrolytique, II, 309.
- B**
- Baille*: voir *Cornu*.
 Balance électrique : Thomson, I, 632; — de torsion de Coulomb : électrique, I, 48; magnétique, I, 303; — d'induction statique de Gordon, I, 171; — d'induction voltaïque de Hughes, I, 605, 608.
Barclay: voir *Gibson*.
Barlow (roue de) : II, 387, 390.
Barrow (cercle de) : I, 383, 386.
 Batterie : voir *condensateur* ou *pile*.
 Batteries secondaires : II, 336; — de Planté, II, 337.
Baudet (pile) : I, 465.
Bequerel (E.): Échelle thermo-électrique, II, 439; — force de polarisation, II, 319; — phosphorescence, II, 240; — pile thermo-électrique, II, 449; — rotation magnétique de la lumière, II, 530, 543.
Bequerel (H.): double réfraction circulaire des corps soumis à l'action du magnétisme, II, 564; — effet du magnétisme terrestre sur la lumière, II, 552; — pouvoir rotatoire magnétique, II, 555; — relation avec l'indice de réfraction, II, 553; — rotation dans l'atmosphère par le magnétisme terrestre, II, 563; — rotation dans les gaz, II, 557.
Bell: Téléphone, I, 589; — et *Tainter*: photophone, II, 599.
Belli: Cap. ind. spéc., II, 616.
Bergmann: Pyro-électricité, II, 444.
Berlin: Balance d'induction de Hughes, I, 608; — note sur l'induction voltaïque, II, 25.
 Bifilaire : (bobine), II, 42, 45; — (suspension), I, 69.
Blaserna: Expériences sur la durée des courants induits, II, 5; — interrupteur différentiel, II, 6.
 Bobine : bifilaire, II, 42; — de résistance, I, 534; — étalon, II, 28.
 Boîte de résistance : I, 537; — à cadran, I, 542; — à curseur, I, 544.
Boltzmann: Comparaison des indices de réfraction et des capacités inductives spécifiques, II, 613; — id. pour les gaz, II, 614; — capacité inductive spécifique : méthode d'attraction, I, 144; méthode des condensateurs I, 139; — capacité inductive spécifique des gaz, I, 198; — Théorie mathématique de la méthode d'attraction, I, 216.
Bosscha: Corollaires, I, 575.
 Bougie électrique : Jablochkoff, II, 418; — Jamin, II, 423; — Wilde, II, 421.
 Boussole : I, 349; — voir *galvanomètre*.
 Bouteille de Leyde : I, 98.
Bouty: Aimantation, I, 341; — aimantations superposées, I, 332; — magnétisme et torsion, I, 346; — moments magnétiques, I, 310.
Bréguet (A.): Rotations électromagnétiques et théorie de la machine de Gramme, II, 388; — téléphone à mercure, I, 591.

Brown : Variations diurnes du magnétisme terrestre, I, 445.
Brush : Machine dynamo, II, 373.
Bunsen : Pile, I, 435.
Dyrne : Pile, I, 449.

G

Câbles électriques (capacité des) : I, 269, 524.
Callaud (pile) : I, 462.
 Caloric : I, 267.
 Capacité : I, 107, 262; — des condensateurs, 263, 269; — des câbles électriques, I, 524; — de la terre, I, 524; — (mesure de la), I, 511, 517; — unité électrostatique, C. G. S., I, 108; — (unités de), dimensions, II, 487, 489; — unité pratique, I, 518.
 Capacité induct. spécif., I, 109; — (bibliographie des travaux sur la), II, 616; — Boltzmann : méthode d'attraction, I, 144; méthode des condensateurs, I, 139; — Cavendish, I, 112; — Faraday, I, 126; — Gaugain, I, 225; — Gibson et Barclay, I, 130, — Gordon, I, 171; — Hopkinson, I, 167; — Romich et Fajdiga, I, 158; — Romich et Nowak, I, 159; — Schiller, I, 161; II, 22; — théorie de la méthode d'attraction de Boltzmann, I, 216; — Wüllner, I, 165; — des gaz : Ayrton et Perry, I, 207; Boltzmann, I, 198; Faraday, I, 129; — des liquides : Silow, I, 162, 164; — Table générale, I, 214.
 Cathode : II, 302.
 Cation : II : 303.
Cavendish : capacité inductive spécifique, I, 112; — électromètre, I, 46; — loi de l'inverse carré, I, 27.
 Cercle de Barrow, I, 383; — de Fox, I, 390.

Chaleur : Loi de Joule, I, 521, 524; II, 437; — dans le circuit, I, 332; — des actions chimiques, II, 332; — relations avec l'électricité, II, 437; — (unité de), I, 267.
 Champ : électrique, I, 258; — magnétique, I, 279; — d'un courant, I, 653; — unité d'intensité, I, 180; dimensions, II, 485; — mesure de l'intensité, II, 532.
 Charge : induite, I, 8; — et potentiel, I, 44; — résiduelle, I, 100, 223; analogie avec la flexion, I, 106; avec la torsion, 105.
 Charbons à lumière : II, 432; — (polarisation des), II, 434.
 Chemin de fer électrique, II, 384.
 Chocs : effet sur la bouteille de Leyde, I, 102.
Clamond : Pile thermo-électrique, II, 449.
Clark (Latimer) : Pile étalon, I, 450; II, 467; — et *Muirhead*, condensateur, I, 107; pile, I, 465.
Clarke : Machine magnéto-électrique, II, 354.
Clausius : Sur l'électrolyse, II, 304.
 Clefs de contact à ressort : simple, I, 474, 541; — double, I, 474; — triple, I, 636.
 Collecteurs pour l'électricité atmosphérique : I, 250.
 Commutateur : I, 468; — à chevilles, I, 471; — à ressort, I, 474; — à rouleau, I, 472; — carré, I, 498; — rapide, I, 477.
 Compensateur : de Jamin, II, 584; — en verre déformé, II, 576.
 Compensation (méthode de), I, 571.
 Condensateurs : I, 98, 106, 262; — absolus ou à air, I, 363, 226; — à anneau de garde, I, 168; — à diélectrique solide, I, 264, 226; — à glissement, I, 136; — à mercure, I, 144; — à paraf-

fine, I, 124; — cylindriques, I, 124; — de Clark et Muishead, I, 107; — chargés en surface, I, 265; en cascade, I, 265; par la pile, I, 264; — (énergie des), I, 271.

Conducteurs : I, 6; — creux, I, 22; en pointe, I, 33.

Conductibilité : électrique spécifique, I, 576; — magnétique, I, 324.

Conduction électrolytique : II, 316.

Constante de Verdet : II, 539, 544.

Constantes : des instruments, I, 76; — des galvanomètres, I, 570; II, 29; — des hélices, II, 35, 41; — des piles, I, 571.

Contact : d'un aimant, I, 322; — (électricité de), II, 453; — des mauvais conducteurs, II, 459.

Couche magnétique : I, 296; — équivalente, I, 651

Coulomb : Balance de torsion électrique I, 48; magnétique, I, 303; — distribution du magnétisme, 311; — loi de la force électrique, I, 26; magnétique, I, 303.

Couple : I, 280.

Cornu : vitesse de la lumière, II, 609; — et *Baille*, intensité du magnétisme terrestre, I, 422; II, 44.

Courant électrique : I, 425; — Aimant équivalent, I, 580, 585; — (champ magnétique produit par un), I, 653; — circulaire (action d'un) sur un aimant placé à son centre, I, 482, 504; sur un aimant extérieur, I, 503; II, 42; — (effets du), I, 454; — mesure, I, 502; électro-magnétique, I, 515; électro-statique, I, 514; — (dimensions de l'unité de) électro-magnétique, II, 485; électro-statique, II, 484; — unité pratique, I, 517, 523.

Courants : (action mutuelle des), I, 581, 588, 650; — action sur les aimants, I, 467, 650; — Loi générale de ces actions, I, 654; — action sur la lumière, II, 403; — alternatifs, II, 353; leur mesure, II, 47, 404, 405; — dérivés, I, 549, 568; — induits, II, 1, 25; durée, II, 5, 23; mesure, II, 4, 26; retard, II, 388; — instantanés, durée, II, 47; mesure, II, 510; — intenses, mesure, II, 403; — moléculaires, II, 238, 271, 299; — secondaires, II, 340; — terrestres, I, 423; — thermo-électriques, II, 439.

Crookes : Matière radiante : II, 237.

Cumming : Inversion des courants thermo-électriques, II, 441.

D

Daniell : pile, I, 436, 457, 458.

Day : voir *Adams*.

Debrun : électromètre capillaire, I, 248; — électro-moteur capillaire, II, 478.

Décharge : en général, II, 114; — d'une batterie, calcul des effets, I, 272; — (arc de), II, 185; — disruptive, II, 157; — dans l'air raréfié, II, 119; — dans les gaz, II, 132, 177, 182; (durée), II, 224, 291; nature, II, 225; — des piles secondaires, II, 345, 349; — unipolaires, II, 226.

Déclinaison : I, 350; — mesure, I, 375; — enregistrement, I, 398; — observations, I, 408, 418; — (carte de la), en France, I, 421; — Variations périodiques, I, 410, 422.

De la Rive : Arc de décharge, II, 186.

De la Rue : pile au chlorure d'argent, I, 443.

De la Rue et Müller : Appareils pour faire le vide, II, 458; — décharge de la pile au chlorure d'argent, II, 157, 175; — distances explosives, II, 130, 175, 185; — électricité de contact, II, 458; — électromètre symétrique, II, 196; — polarisation des électrodes d'un tube à décharge, II, 321, 331; — stries, II, 157; — et *Spottiswoode*, stries, II, 139.

De Méritens : Machine magnéto-électrique, II, 364.

Demi-cercle tournant : I, 623.

Densité : électrique, I, 37, 261; — (unité C. G. S. de), I, 79; — (piles de), I, 440, 461.

Deprez (Marcel) : Galvanomètres et mesurcurs de courant, I, 509; II, 403; — mesureur d'énergie, II, 402; — moteur et machine magnéto-électrique, II, 382; — synchronisme électrique, II, 384.

Déformation : I, 29.

Dérivations : des galvanomètres, I, 548, 569; — construction, I, 552; — pouvoir multiplicateur, I, 569; résistance de compensation, I, 555, 569; — (théorie des), I, 549.

Détente et non détente (effets de) : II, 203, 266.

Diamagnétisme : II, 55.

Diamagnétiques (corps) : I, 334; II, 54, 56; — (liquides), II, 72; — polarité, II, 59.

Diaphragme : I, 613.

Diélectriques : I, 110; — (résistance des), I, 578.

Différence de potentiel : voir Force électro-motrice.

Diffusion de l'électricité : I, 117.

Dimensions des unités : II, 479; — (Rapports des), II, 483.

GORDON. Électricité.

Distance explosive : II, 128, 130, 175, 185.

Distributeur des courants : I, 502

Duplicateur tournant de Nicholson : I, 255.

Duler : Aimants circulaires et elliptiques, I, 327.

Dynamo (Machines) : II, 366.

Dyne : I, 82.

E

Ébonite : cap. ind. spéc., I, 192.

Éclairage électrique : II, 408, 432; — des salles, II, 434; — des villes, II, 433.

Écrans : électriques, I, 8; — magnétiques, II, 396.

Edison : Electro-motographe, II, 328; — lampe électrique, II, 426; — micro-lasimètre ou thermoscope, II, 602; — téléphone, I, 598.

Électricité atmosphérique : I, 250.

Électricité de contact : II, 453; — Ayrton et Perry, 460; — De la Rue et Müller, 459; — Faraday, 455; — Jenkin, 461, 467; — Maxwell, 455; — Thomson (Joseph), 459; — Thomson (William), 455; — Volta, 454.

Électricités + et - : I, 3, 25.

Électriques (machines) : I, 12, 254; (Voir machines.)

Électrisation : du frotteur, I, 4; — par frottement, I, 2; — par induction, I, 7, 23; — (transport de l'), I, 5.

Électro-aimant : I, 580; II, 51.

Électro-chimie : I, 502; II, 302, 314.

Électro-cinétique : I, 425; — définition, I, 41.

Électrodes : II, 302; — linéaires (Exp. d'Adams), II, 93.

Électro-diapason : I, 498.

Électro-dynamique : I, 502.

II. — 41

- Électro-dynamomètre : Association Britannique, II, 31 ; — Deprez, 402 ; — Joule, 50 ; — Siemens, 404 ; — Weber (description), 48 ; (théorie), 46.
- Électrolyse : (conservation de l'énergie dans), II, 392 ; — définitions, 302 ; — lois, 303 ; — produits secondaires, 316.
- Électrolytes : II, 302 ; — (résistance des), II, 329.
- Électrolytique : (conduction), II, 316 ; — (polarisation), 309, 317, 330, 333.
- Électro-magnétisme : I, 467, 502, 580.
- Électro-magnétique : (force), I, 616 ; — (induction), I, 581, 614 ; — (système) d'unités, I, 515, 522, 619, 646 ; dimensions, II, 479 ; — (théorie) de la lumière, II, 607.
- Électromètre : absolu de Thomson, I, 87 ; — à décharges de Boltzmann, I, 151 ; de Gaugain, I, 225 ; — à feuilles d'or, I, 6, 47 ; — à quadrants de Thomson, I, 53 ; modèle d'Elliott, I, 56 ; modèle de White, I, 59 ; sa dissymétrie, I, 239 ; formule, I, 238 ; — capillaire, de Debrun, I, 248 ; de Lippmann, I, 240 ; — de Branly, I, 251 ; — de Cavendish, I, 46 ; — de Lane, I, 46 ; — enregistreur de Rédier, I, 253 ; de Salleron, I, 252 ; — idiosyncratique, I, 87 ; — portatif, I, 97, 252 ; — symétrique de De la Rue, I, 240 ; II, 196 ; de Mascart, I, 568.
- Électromètres : I, 46 ; — pour l'électricité atmosphérique, I, 251.
- Électromoteur capillaire : de Debrun, II, 478 ; — de Lippmann, II, 477.
- Électro-motographe d'Édison : II, 328.
- Électro-optique : II, 511 ; — (loi) de Kerr, II, 579, 586 ; — (pouvoir), II, 573.
- Électrophore : I, 18.
- Électroscopes : (voir électromètres),
Électro-statique : I, 1 ; — définition, I, 51 ; — (formules), I, 258.
- Élias : procédé d'aimantation, I, 314.
- Énergie : (définition et unités), I, 267 ; — électrique, I, 260 ; des condensateurs, I, 274 ; — et force électro-motrice, I, 520 ; — conservation dans l'électrolyse et l'induction, II, 332 ; — transformation de l'énergie mécanique en électricité statique, I, 254 ; en électricité dynamique et réciproquement, II, 353.
- Enregistreurs : électriques, I, 252 ; — magnétiques, I, 398.
- Équateur magnétique : I, 354.
- Équatoriale (ligne) : II, 54.
- Équilibre électrique (équation de l') : I, 264.
- Équipotentiels : (points, lignes et surfaces), I, 42, 259 ; — (tracé des lignes et surfaces), exp. d'Adams, II, 78, 90.
- Équivalent mécanique de la chaleur : I, 267.
- Équivalents électro-chimiques : II, 307, 314.
- Errata : I, XV ; — II, 617.
- Erg, I, 82, 267.
- Espace : blanc, II, 222 ; — obscur au pôle négatif, II, 222, 238, 296.
- Étalon : (bobine), II, 28 ; — (pile) de Daniell, I, 458 ; de L. Clark, I, 450 ; — (résistance), I, 534, 619 ; — (tube), II, 268.
- Éther : I, 31, 236.
- Étincelle : II, 114, 119, 175.
- Exposant (notation de l') : I, 290.
- Extra-courant : II, 3, 23, 25.

F

Faisceau magnétique : I, 320.
Fajliga : voir *Romich*.
 Fantômes magnétiques : I, 300, 307 ; II, 389, 337.
Farad : I, 518.
Faraday : Cap. ind. spéc. I, 126 ; des gaz, I, 129 ; — diamagnétisme, II, 55 ; — (disque de), II, 387, 390 ; — électricité de contact, II, 454 ; — électrolyse, II, 302 ; — induction électromagnétique, I, 581 ; — rotation magnétique de la lumière polarisée, II, 513.
Farmer-Wallace : Machine dynamo, II, 374 ; — régulateur électrique, II, 418.
Felici : cap. ind. sp., II, 616.
 Ferro-magnétiques (corps) : II, 54.
 Fils télégraphiques (capacité des) : I, 263, 269.
 Flexion et charge résiduelle : I, 106.
 Flint-glass : (cap. ind. spéc.), I, 167.
 Fluorescence : II, 133.
 Flux : (tracé expérimental des lignes de) II, 94.
 Fonction magnétisante : I, 336.
 Force : (lignes de), I, 430, 299 ; II, 389 ; — (transmission électrique de la), II, 383 ; — (unités de), I, 81 ; dimensions, II, 481.
 Force électrique : (loi de la), I, 26 ; — (nature physique de la), I, 28 ; — résultante, I, 258.
 Force électro-magnétique : I, 616.
 Force électro-motrice : I, 38, 262 ; — des piles (comparaison de la), I, 571 ; détermination par l'électromètre, I, 90, 267 ; par la chaleur chimique, II, 335 ; par les différences de potentiel aux contacts, II, 470, 476 ; — de polarisation, II, 319 ; — d'induction, I, 617 ; — et énergie, I,

520 ; — (siège de la), I, 429 ; — signification mécanique, II, 333 ; — (table de la) des piles, I, 456 ; — unités, I, 84, 516, 523 ; dimensions, II, 488.
 Force magnétique : (loi de la), I, 303 ; — de la terre, variations, I, 409 ; totale, I, 355, 386, 395, 409, 422 ; horizontale, I, 357, 400, 421 ; II, 44 ; verticale, I, 403.
 Force portative des aimants : I, 322.
Foucault (disque de) : II, 388.
Fox (cercle de) : II, 390.
Füller (pile de) : 465.

G

Galilée (aimant de) : I, 347.
 Galvanomètres : I, 478 ; — balistiques, I, 496 ; résistance de l'air, I, 512 ; — à cadre conique, I, 486 ; — aperiodiques, I, 508 ; — à réflexion, I, 493 ; constante et formule de mérite, I, 570 ; — astatique, I, 489 ; — Deprez, I, 509 ; — II, 403 ; — Gaugain, I, 504 ; — de torsion (Siemens), II, 403 ; — des cosinus, I, 484 ; II, 403 ; — des sinus, I, 506 ; — des tangentes, I, 478, 503 ; — différentiels, I, 497, 508 ; — étalons, II, 28 ; — marins, I, 495 ; II, 397 ; — sensibles, I, 488, 506 ; — dérivations, I, 518, 569 ; — (mesure de la résistance des), I, 556.
 Galvanoscope (emploi du téléphone comme) : I, 601.
Gassiot, stries : II, 136.
 Garde (anneau ou plateau de) : I, 88, 168.
Gaugain : Aimantation, I, 343 ; — aimantations superposées, I, 331 ; — boussole, I, 504 ; — capacité ind. spéc., I, 225 ; — charge

siduelle, I, 233; — pyro-électricité de la tourmaline, II, 444.

Gauss: aimants, I, 306; — barreaux aimantés, I, 340.

Geissler (tube de): II, 133.

Gibson et Barclay: Cap. ind. sp., I, 130; — comparaison des cap. ind. sp. et des indices de réfraction, II, 612.

Gordon: Cap. ind. sp. et balance d'induction, I, 171; — comparaison des cap. ind. sp. et des indices de réfraction, II, 613; — constante de Verdet, II, 544; — étincelle dans l'air raréfié, II, 124; — interrupteur à grande vitesse, II, 107; — rotation de la lumière polarisée sur le pôle d'un aimant, II, 590.

Gower: Téléphone, I, 593.

Gramme: Machines dynamo, II, 370; — à courants alternatifs, II, 376; — magnéto-électriques, II, 360; — (théorie de la machine), par A. Bréguet, II, 388.

Grandeurs électriques: (relation entre les), I, 521.

Grove: (pile de), I, 433.

H

Harris: Décharge dans l'air raréfié, II, 119.

Hélice (constantes d'une): II, 35.

Hockin: Mesure du rapport des unités, II, 507.

Holtz: Machine électrique, I, 14, 257.

Hopkinson: Cap. ind. spéc., I, 167; — charge résiduelle, I, 102.

Hughes: Balance d'induction voltaïque, I, 605, 608; — microphone, I, 592.

Horticulture électrique: II, 436.

I

Incandescence (éclairage par l'): II, 425.

Inclinaison: I, 352; — Obs. par le cercle de Barrow, I, 383; de

Fox, I, 394; — Tables I, 409, 418.

Indices de réfraction et pouvoirs rotatoires magnétiques: II, 553.

Induction: (bobine d'), II, 96; condensateur, 100; décharge,

114; de l'Institut polytechnique, 113; de Ruhmkorff, 111;

de Siemens, 113; de Spottiswoode, 108; — (courants d') II, 1;

— dans les plaques conductrices, I, 609; II, 386; — (électrisation par) I, 7, 23; — électro-

magnétique, I, 581, 614; — (force électro-motrice d') I, 617; — mag-

nétique, I, 286, 333; — (multiplicateurs d') I, 255; — (plaque d') I, 70; — spécifique (coefficients d') I, 613; — statique

(balance d') I, 171; — voltaïque (balance d') I, 605.

Inductive (capacité): voir Capacité

Interrupteur: II, 100; — à grande

vitesse de Gordon, 107; — à

lame vibrante, 100; — à main,

102; — à mouvement d'horlogerie, 103; — à roue, 104; — rapide de Spottiswoode, 105; — différentiel de Blaserna, II, 6.

Inégalités: diurnes du magnétisme terrestre, I, 412; — diurnes lunaires, 413.

Intensité: d'aimantation, I, 288, 335; des barreaux de Gauss, 340

de la terre, 340; — (unité d'), I,

292; — de Courant, voir courant.

Inversion des courants thermo-électriques: II, 440.

Ion: II, 303.

Isolants: (corps): I, 6.

Isoloirs de Mascart: I, 251, 664.

J

Jablochkoff: bougie électrique, II 418.

Jamun : Aimants, I, 289; II, 363; — aimantations superposées, I, 331; — bougie électrique, II, 423; — compensateur, II, 584; — constitution des aimants, I, 316; — distribution du magnétisme, I, 314; — grand aimant, I, 323.

Jauge électrométrique : I, 66.

Jellett (prisme de) : II, 547.

Jenkin : électricité de contact, II, 461, 467; — Unité B. A., I, 626.

Joubert : recherches sur les machines dynamo, II, 404; — sur l'arc voltaïque des bougies, II, 434.

K

Kerr : effets chromatiques, II, 581; — loi électro-optique, 579; — relation entre la lumière polarisée et l'électricité statique, 570; — rotation de la lumière polarisée réfléchie sur le pôle d'un aimant, 589; sur le côté d'un aimant, 591.

Kirchoff (lois de) : I, 571.

Knochenhauer : décharge dans l'air raréfié, II, 120.

Kohlrausch : mesure de la force horizontale de la terre, II, 44; — électrolyse, II, 315; — et *Weber*, rapport des unités, II, 497.

Kündt et Röntgen : rotation de la lumière polarisée dans la vapeur, II, 556; dans les gaz, 560; dans l'air par le magnétisme terrestre, 563.

L

Labourage électrique : II, 384.

Ladd : machines dynamo, II, 369; — machine de Holtz, I, 17.

Lampes électriques : II, 409; — à incandescence, 425; — différentielles, 415; — diverses, 417.

Lane : électromètre, I, 46.

Leclanché : piles, I, 442, 463.

Lenz (loi de), II, 18.

Leyde (bouteille de), I, 98; — analogie avec la pile secondaire, II, 309, 320.

Lignes : de force, voir Force; — téléphoniques, I, 601.

Lippmann : électromètre capillaire, I, 240; — électromoteur capillaire, II, 477; — force de polarisation, II, 319; — polarisation des électrodes, II, 318; — résistance des liquides, II, 330.

Longueur (unité de) : I, 77.

Lontin : machines dynamo, II, 375; — régulateurs électriques, 415, 417.

Lueur négative : II, 222.

Lumière : effet sur le sélénium, II, 594; — électrique, II, 408; charbons, II, 432; division, 434; unité, 432; — théorie électro-magnétique, II, 607; — polarisée, II, 511; action des aimants, 516; action des courants, 525; double réfraction circulaire par le magnétisme, 564; effet du magnétisme terrestre, 552, 563; relation avec l'électricité statique, 570, 574; rotation par réflexion sur le pôle ou le côté d'un aimant, 590; — (vitesse de la) comparée à celle de l'induction électro-magnétique, II, 609.

Luminosité positive : II, 288.

Lunaires (inégalités diurnes) : I, 413.

M

Machines dynamo-électriques : définition, II, 353; — principe, 368; — à courants alternatifs, 375; Gramme, 376; Lontin, 376; Siemens, 377; — id. auto-excitatrices, 375; Gramme

- 377; Wilde, 379; — à courant continu, 370; Brush, 373; Farmer-Wallace, 374; Gramme, 370; Ladd, 369; Lontin, 375; Maxim, 375; Siemens, 371; Weston, 375; Wilde, 366; — Application à la télégraphie, 407; — enroulement des fils, 375; — position dyssymétrique des frotteurs, 400, 406; — réversibilité, 382.
- Machines électriques : I, 12; à frottement, 12; de Holtz, 14, 257; — de Ladd, 17; — d'induction statique, 254.
- Machines électro-magnétiques : II, 353, 379.
- Machines excitatrices : II, 367, 372, 375.
- Machine de Gramme (théorie de la), par Bréguet : II, 388; — Recherches de Mascart et Angot, 400.
- Machine de Siemens : recherches de M. Joubert, II, 404.
- Machines magnéto-électriques : II, 352; — de Clarke, 354; — de Deprez, 382; — de Faraday, 387; — de Gramme, 360; — de Holmes, 356; — de l'Alliance, 356; — de Méritens, 364; — de Niaudet, 375; — de Pixii, 354; — de Saxton, 354; — de Siemens, 358.
- Machine rhéostatique : II, 345, 347.
- Mac Kichan : rapport des unités, II, 500.
- Mac Leod (jauge de) : II, 161.
- Magnétisme : I, 273; distribution, 311, 318; — de rotation, II, 386; — et cristaux, II, 73; — et lumière, II, 511; — et torsion, I, 346; — terrestre, I, 349; mesures, 356; observations, 406, 417; effet sur la lumière polarisée, II, 552, 563.
- Magnétomètres : enregistreurs, , 398; — unifilaires, I, 357, 375.
- Mance : résistance des piles, I, 558 575.
- Marié-Davy (pile de) : I, 463.
- Mascart : électricité atmosphérique, I, 253; — électromètre symétrique, I, 240, 658; — isoloirs, I, 664; — et Angot, recherches sur la machine Gramme, II, 400.
- Masse (unité de) : I, 78.
- Masson : décharge dans l'air raréfié, II, 120.
- Matière radiante : expériences de Crookes, II, 236; de Spottiswoode et Moultons, II, 271.
- Matteucci : courants induits dans les plaques, II, 387.
- Maxim : machine dynamo, II, 375; — régulateur, II, 417.
- Maxwell : aimantation par induction, I, 333; — comparaison des unités, II, 500; — détermination de Weber et Kohlrausch, II, 497; — le rapport est une vitesse, 494; — nature physique de v , 508; — couche magnétique, I, 296, 650; — électricité de contact, II, 455; — électrolyse, II, 304, 443; — notation pour les dimensions des unités, II, 481; — résumé des expériences électro-optiques de Faraday et de Verdet, II, 539; — théorie de la rotation magnétique de la lumière polarisée, II, 565; — théorie électro-magnétique de la lumière, II, 607; — vitesse de l'induction électro-magnétique, II, 493.
- Mercadier : électro-diapason, I, 499; — radiophonie, II, 603.
- Méridien : astronomique, détermination, I, 377; — magnétique, id., I, 378.
- Mesure absolue, I, 74; — mesures

électriques (systèmes de), I, 522;
— pratiques, I, 526, 571.
Mesureurs : de courants, II, 403,
voir Galvanomètres; — d'éner-
gie, II, 402, 404.
Microfarad, I, 518, 524.
Microphone de Hughes, I, 592.
Micro-tasimètre d'Edison : I, 602.
Milieu : (nécessité d'un), I, 29; —
(effets du) sur les diamagné-
tiques, II, 76.
Miller, électrolyse, II, 305.
Minotto (pile de), I, 461.
Miroir : (méthode du) appliquée aux
électromètres, I, 58; aux galva-
nomètres, 493; — tournant, II,
148, 163.
Moment : I, 281; — d'inertie, I,
308; — magnétique, I, 282; — de
la terre, 290; — mesure, 307;
— unité, 290.
Moteurs électriques : II, 353; — de
Apps, 381; — de Deprez, 382;
— rendement, 401.
Moulton, voir *Spottiswoode*.
Mouton, recherches sur les courants
induits, II, 23.
Muirhead, voir *Clark*.
Müller, voir *De la Rue*.
Müller, limite d'aimantation, I, 337.
Multiplicateurs : d'induction, I, 254;
à gouttes d'eau, 257.

N

Niaudet : pile au chlorure de chaux,
I, 464; — machine magnéto-
électrique, II, 375.
Noé, pile thermo-électrique, II,
451.
Nowak, voir *Romich*.

O

Ohm : ou unité B. A., I, 518; — (lois
de), I, 513, 568, 655.
Ombres : produites par la matière
radiante, II, 248; — virtuelles,
II, 285.

Opacité des corps conducteurs, II,
608.
Oscillations : électriques, Schiller,
I, 161; II, 19; — application à
la mesure des cap. ind. spéc., II,
22; — de l'extra-courant, II,
161.

P

Paraffine (cap. ind. spéc. de la), I,
130, 138, 182.
Paramagnétiques (corps), I, 334;
II, 54.
Paratonnerres, I, 34.
Pellier (phénomène de), II, 442.
Phelps, récepteur téléphonique, I,
599.
Phosphorescence : II, 239, 271; —
de détente, II, 280.
Photophones de Bell et Tainter,
II, 599.
Piles : voltaïques, I, 425; — à un
liquide, 428; — à deux liquides,
433; — à densité, I, 440, 461; —
à auges de Thomson, I, 440; — à
gaz, II, 318; — au bichromate
de potasse, I, 431, 443; — id.
de Baudet, I, 465; — id. et à
mercure de Füller, I, 465; — au
calomel, I, 464; — au chlorure
d'argent, I, 443; — au chlorure
de chaux, I, 464; — Bunsen, I,
435; — Byrne, I, 449; — Cal-
land, I, 462; — Clark (étalon),
I, 450; II, 467; et *Muirhead*, I,
465; — constantes, I, 431; II,
325; — Daniell, I, 436; étalon,
458; formes diverses, 457; force
électro-motrice, II, 470, 476; —
Grove, I, 453; onctretien, I,
453; force électro-motrice,
II, 476; — Leclanché, I, 442,
463; — Marié-Davy, I, 463; —
Minotto, I, 461; — Poggendorff,
II, 448; — Reynier, I, 458; —
secondaires, II, 318, 336; —

Smée, I, 431; — thermo-électriques, II, 439, 449.

— Accouplement, I, 452, 559; — forces électro-motrices, détermination, I, 571; II, 470; table, I, 456; — polarisation, II, 325; — résistance intérieure, I, 558, 574; — signe conventionnel, I, 455.

Pixii, machine magnéto-électrique, II, 353.

Plan d'épreuve, I, 8.

Planté: batteries secondaires, II, 337; — machine rhéostatique, II, 345, 347.

Platymètre, I, 130.

Poggendorf: méthode de compensation, I, 571; — pile, I, 448.

Point neutre, II, 441, 448.

Pointes (pouvoir des), I, 33, 271.

Polarité diamagnétique, II, 59.

Polarisation: électrolytique, II, 309; — des électrodes dans la pile, II, 317, 325; — dans un tube à décharges, II, 321, 331; — dans le sélénium, II, 596; — des charbons de l'arc voltaïque, II, 434; — (force électro-motrice de) II, 319; — (nécessité de la), II, 333; — de la lumière (rotation magnétique du plan de), II, 511.

Pôles: de la pile, I, 428; — magnétiques, I, 274, 279; — d'une aiguille (action de la terre sur les), I, 294; — unité, I, 289.

Pont de Wheatstone: I, 526; — formes pratiques, I, 532; — à curseur, I, 532.

Poste aux lettres électrique, II, 384.

Potentiel: électrique, I, 38, 258; — des machines électriques, I, 270; — d'un élément Daniell, I, 267; (différence de), voir Force électro-motrice; dans les tubes à

décharge, II, 180, 192; — (relation des variations du) avec l'intensité, I, 655; — unités, 516, 523; — dimensions, II, 487; — magnétique, I, 285.

Potentiomètre, I, 572.

Pouvoirs: électro-optiques, II, 571 — rotatoires magnétiques, II, 552; négatifs, 554; des gaz, 559, 562; — thermo-électriques, II, 445.

Pression électrique, I, 262, 270.

Pyro-électricité, II, 444.

Q

Quantité: électrique, I, 20, 23; mesure par les voltamètres, II, 314; — Unités, I, 83, 516, 523; leurs dimensions, II, 484, 486; leur rapport, II, 487; — magnétique (unité de), I, 305.

R

Radiante (matière), II, 237 (voir Courants moléculaires).

Radiomètre électrique, II, 252.

Radiophonie, II, 603.

Rails et curseur, I, 582, 620.

Rapport des unités, II, 490, 494, 497.

Rechargeur, I, 67, 256.

Régulateurs électriques: II, 409; — à division, II, 413.

Reis, téléphone, I, 345.

Rendement des moteurs électriques, II, 401.

Résiduelle (charge), I, 100, 233.

Résistance: électrique, I, 513; — (bobines de), I, 534; — (boîtes de), I, 537, 542; — de compensation, I, 555, 569; — de l'arc voltaïque, II, 433; — des diélectriques, I, 578; — des électrolytes, II, 329; — des galvanomètres, I, 556, 576; — des gaz, II, 477, 479, 330; — des piles,

- I, 558, 574; — (mesure des), I, 526; — mesure électro-magnétique, I, 517; — électro-statique, 514; — opposée par l'air aux oscillations de l'aiguille, I, 512; — spécifiques, I, 546, 576; effet de la température, I, 577; — (unités de), I, 517, 567; unité B. A., I, 619, 646; dimensions, II, 488.
- Réversibilité: de l'effet thermo-électrique, II, 442; — de la machine Gramme, II, 382, 388.
- Reynier: lampe, II, 427; — pile, I, 458.
- Rhéostat: I, 537; — à curseur, I, 544.
- Rhéostatique (machine), II, 345.
- Rhéotome: voir Interrupteurs; — à liquide, II, 327.
- Roberts, Chandler, exp. avec la balance de Hughes, I, 607.
- Romich: et *Fajdiga*, cap. ind. spécifique, I, 158; — et *Nowak*, I, 159.
- Röntgen: relations entre l'électricité statique et la lumière polarisée, II, 574; — et *Kündt*, voir *Kündt*.
- Ross (capitaine), sur le cercle de Fox, I, 396.
- Rosselli: Cap. ind. spéc., II, 616.
- Rotations électro-magnétiques, II, 389.
- Rotation: magnétique de la lumière polarisée, II, 511; dans les gaz, 557, 560; par réflexion sur un aimant, 589; — naturelle, II, 513, 515.
- Rowland: effet magnétique d'une charge statique en mouvement, II, 508; — limite d'aimantation, I, 338.
- Rühlmann, voir *Wiedemann*.
- Ruhmkorff (bobine de), II, 111.
- S**
- Sabine (général), observations magnétiques, I, 440.
- Saxton*, machine magnéto-électrique, II, 354.
- Schiller*: cap. ind. spécifique et oscillations électriques, I, 161; II, 19; — comparaison des cap. ind. spéc. et des indices de réfraction, II, 613.
- Secondaires (piles ou batteries), II, 318, 320, 336.
- Sélénium: II, 574; — (récepteur au), 602.
- Sensitif (état): dans les vides modérés, II, 196; — dans les vides extrêmes, 265.
- Siemens: armature, II, 358; — bobine d'induction, II, 113; — chemin de fer électrique, II, 384; — électro-dynamomètre de torsion, II, 404; — galvanomètre de torsion, II, 493; — horticulture électrique, II, 436; — lampe différentielle, II, 415; — machines dynamo, II, 371, 377, 404; — poste électrique, II, 384; — unité, I, 567.
- Silow: cap. ind. spécifique des liquides, I, 162, 164; — comparaison avec les indices de réfraction, II, 614.
- Smée (pile), I, 431.
- Solénoïdes: I, 586; — magnétiques I, 295.
- Sonomètre, I, 606, 612.
- Soufre (cap. ind. spéc. du), I, 157 231.
- Spottiswoode*: bobine d'induction, II, 108; — interrupteurs, II, 104, 105; — miroir tournant, II, 148; — stries, II, 143; — (*De la Rue, Müller* et), II, 139; — et *Moulton*, état sensitif, II, 196, 265.
- Stoletow*, coefficients d'aimantation, I, 336.
- Stratifications, voir Stries.
- Stries: II, 135; — (nature des), 217; — structure physique, 223

Sulfure de carbone : cap. ind. spécifique, I, 194; — (rotation magnétique de la lumière dans le), II, 544.

Superposition : des aimantations, I, 330; — des charges dans la bouteille de Leyde, I, 104.

Swan (lampe électrique de), II, 427.

Synchronisme par l'électricité, De-
prez, II, 384.

Système : d'unités absolues, I, 75; C. G. S., 77; — d'unités élec-
triques, I, 522.

T

Table des aimantations temporaire
et permanente, I, 338.

Table des capacités inductives spé-
cifiques : Table générale, I, 214; — Ayrton et Perry, gaz, I, 212; — Cavendish, 120, 125; — Boltzmann, I, 144, 155, 156, 158; gaz, I, 205, 206, 207; — Faraday, I, 129; — Gaugain, I, 228, 230, 231; — Gordon, I, 191, 192, 193, 194; — Hopkin-
son, 170; — Romich et Fajdiga, I, 158; — Romich et Nowak, I, 160; — Schiller, I, 162; — Silow, I, 164, 165; — Wüllner, I, 166.

Tables des comparaisons des cap.
ind. spéc. et des indices de ré-
fraction, II, 612, 613, 614.

Table : des changements horaires
de la déclinaison, I, 422; — des
changements séculaires de la
capacité inductive spécifique du
verre, I, 194, 195; de la décli-
naison, I, 408, 418; — de l'in-
clinaison, I, 409, 418; — des
moyennes mensuelles du poten-
tiel électrique de l'atmosphère,
I, 254.

Table : des corps diamagnétiques,

II, 56, 58; — des différences de
potentiel au contact, II, 473,
474; — des dimensions des deux
séries d'unités et de leurs rap-
ports, II, 490; — des distances
explosives : De la Rue et Müller,
II, 132, 176, 185, 189; Gordon,
126; Thomson, 129; — des
forces électro-motrices des di-
verses piles, I, 456; — de l'élec-
tromètre capillaire de Lippmann,
I, 246; — de la loi électro-op-
tique de Kerr, II, 586; — des
observations d'oscillation, I, 373;
— des pouvoirs rotatoires ma-
gnétiques : Verdet, II, 542; Bec-
querel, II, 555, 559; Kündt et
Röntgen, 562; — des pouvoirs
thermo-électriques, d'après Mat-
thiessen, II, 446; d'après Tait,
447; — des retards des courants
induits dans diverses substances,
Blaserna, II, 12; — des rela-
tions magnétiques de la lumière
dans le verre pesant, Verdet, II,
535; — des rotations de diffé-
rentes radiations, II, 543; — des
rotations par le magnétisme ter-
restre, II, 564; par réflexion
sur le pôle d'un aimant, II, 591.

Tables des résistances spécifiques,
I, 547, 548; — des valeurs de
 v , II, 210.

Taches solaires (effet sur le magné-
tisme terrestre), I, 414.

Tainter, voir *Bell*.

Tait, pouvoirs thermo-électriques,
II, 441, 447.

Téléphone : de Bell, I, 589; A.
Bréguet, I, 591; Edison, I,
598; Gower, I, 593; Reis, I,
345; — emploi comme galva-
noscope, 601; — installation, I,
595, 600; — (lignes pour), 601;
— récepteur Phelps, I, 599; —
signal Ader, I, 596.

Tension électrique, I, 262.
 Terre : (aimantation de la), I, 340;
 — (communication à la), I, 10;
 — (force magnétique de la), I,
 409, 421; II, 44; — (moment
 magnétique de la), I, 290.
 Thermo-électricité, II, 437.
 Thermo-électrique : (chaîne), II,
 448; — (échelle), 439; —
 (pile), 439, 440; — (pouvoir),
 445.
 Thermoscope d'Edison, 602.
 Thomson (*Joseph*), Électricité au
 contact des mauvais conducteurs,
 II, 459.
 Thomson (*Sir William*) : balance
 électrique, I, 632; — détermi-
 nation de l'unité B. A., I, 625, 648;
 — détermination de v , II, 498;
 — électricité de contact, II, 455;
 — électromètres absolus, I, 87;
 à quadrants, I, 53; — force élec-
 tro-motrice nécessaire pour l'é-
 tincelle, II, 128; — galvanom-
 ètres à réflexion, I, 493; — multi-
 plication à gouttes d'eau, I,
 257. — pile à auges, I, 440; —
 potentiel d'un élément Daniell,
 I, 267; — rechargeur, I, 256;
 — résistance du galvanomètre
 (détermination de la), I, 556,
 575; — et *Varley*, rhéostat à
 curseur, I, 544.
 Torsion : (balance de), voir Balance;
 — et charge résiduelle, I, 105;
 — et magnétisme, I, 346.
 Tourbillons moléculaires, II, 566.
 Transformation : du travail méca-
 nique en électricité statique, I,
 254; en électricité dynamique, II,
 353; — de l'électricité en tra-
 vail, II, 353, 379.
 Transmission électrique de la force,
 II, 383.
 Travail : électrique, I, 521, 524; —
 (unité de), I, 82.

Trembleur, II, 100.
 Trou, rainure et plan, II, 465.
Tyndall : action du magnétisme sur
 les cristaux, II, 74; — chaleur
 de l'arc voltaïque, II, 435; —
 diamagnétisme, II, 62, 66.

U

Unité : B. A. de résistance, I, 619;
 — Siemens, I, 567.
 Unités : absolues I, 75; C. G. S. 76;
 — dérivées, I, 79; — électri-
 ques, 513, 522; comparaison
 expérimentale, II, 493; — di-
 mensions, II, 479; — rapports,
 II, 490; — magnétiques, I, 289.

V

v , rapport des unités : détermi-
 nation expérimentale, II, 493; na-
 ture physique, 508; valeur, 510.
 Variation : I, 350; — (effet de la)
 des courants, I, 584; II, 2; —
 du magnétisme terrestre, I, 406.
Varley : piles secondaires, II, 321;
 — résistance électrique des gaz,
 II, 179, 330; — et *Thomson*,
 rhéostat à curseur, I, 544.
Verdet : (constante de), II, 539, 544;
 — diamagnétisme, II, 60; — ro-
 tation magnétique de la lumière
 polarisée, II, 530.
 Verre : fluorescent, II, 133; — pe-
 sant, II, 513, 535; — optique
 (cap. ind. sp. du) : Gordon, I,
 194; Hopkinson, I, 167; — phos-
 phorescence, II, 239, 271.
 Vibrations d'un aimant, moyen de
 les arrêter, I, 380.
 Vide : (tubes à), II, 133; effet de
 bouteille de Leyde, II, 269; phos-
 phorescence, II, 233, 271; —
 d'acide carbonique, II, 136, 161
 — (moyens de faire le), II, 158.
 Vis d'attache, I, 430.

Vitesse : de l'induction électro-magnétique, II, 607; comparaison avec celle de la lumière, II, 609; — (unité de), I, 80; dimensions, II, 479.
Volt, I, 518.
Volta, électricité de contact, II, 454.
 Voltaïque (pile), I, 425.
 Voltamètre, II, 308, 314.

W

Walker : courants terrestres, I, 423, — magnétisme terrestre, I, 350.
Ward, interrupteur rapide, II, 107, 273, 275.
Weber : bobine bifilaire, II, 42; — diamagnétisme, II, 65; — électro-dynamomètre, II, 46, 48; — limite d'aimantation, I, 337; — (le), unité, I, 518; — et *Kohlrausch*, détermination du rapport des unités, II, 497.

Werdermann, lampe électrique, II, 430.
Weston, machine dynamo, II, 375.
Wheatstone : (Pont de), I, 526; — force de polarisation, II, 319.
Wiedemann : aimantations superposées, I, 330; effet de la température sur l'aimantation, I, 343; — magnétisme et torsion, I, 346; — rotation magnétique de la lumière polarisée, II, 530; — et *Rühlmann*, décharge dans l'air raréfié, II, 120.
Wilde : bougie électrique, II, 421; — machine dynamo, II, 366; auto-excitatrice, 379.
Wüllner, capacité inductive spécifique, I, 165.

Z

Zinc amalgamé, I, 429; II, 327.

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE